

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

**Modelování a simulace výkonových poměrů
pohonu s asynchronním motorem napájeným
z nepřímého měniče kmitočtu**

**Modelling and Simulation of Power
Circumstances of Drive with Induction Motor
and Indirect Frequency Converter**

2013

Pavel Letocha

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Pavel Letocha

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2612T015 Elektronika

Téma:

Modelování a simulace výkonových poměrů pohonu s asynchronním motorem napájeným z nepřímého měniče kmitočtu
Modelling and Simulation of Power Circumstances of Drive with Induction Motor and Indirect Frequency Converter

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor ztrát v asynchronním motoru a měniči kmitočtu
2. Sestavení matematického a simulačního modelu pohonu s uvažováním ztrát
3. Simulační ověření výkonových poměrů pohonu s uvažováním ztrát

Seznam doporučené odborné literatury:

Dle pokynů vedoucího závěrečné práce

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ivo Neborák, CSc.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013

doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty


Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vykonal samostatně. Uvedl jsem všechny použité zdroje, ze kterých jsem čerpal.

Rád bych zde poděkoval všem, kteří mi byli oporou a jakkoliv mi byli nápomocni při tvorbě této diplomové práce. Na prvním místě bych chtěl poděkovat vedoucímu své diplomové práce panu doc. Ing. Ivo Neborákovi, CSc. za ochotu a pomoc při konzultacích a poskytnutí podkladů. Dále bych velmi rád poděkoval své rodině za podporu během celého dosavadního studia.

V Ostravě, dne 01. 05. 2013

Podpis.....



Abstrakt

Cílem této diplomové práce je prezentace stavu problematiky výkonových poměrů pohonu s asynchronním motorem napájeným z nepřímého měniče kmitočtu s napětovým meziobvodem na základě zpracování a sestavení matematických modelů a příslušných simulací. Jednotlivé modely byly v rámci daného pohonu řešeny ve dvou částech. Nejprve bez uvažování vlivu ztrát a poté po implementaci příslušného matematického aparátu a odpovídajících simulačních bloků rovněž s doplněním odpovídajících ztrát jak pro asynchronní motor s kotvou nakrátko, tak pro nepřímý měnič kmitočtu. Ostatní zjednodušující předpoklady však byly respektovány a uplatněny. K řešení modelů a simulací byl použit vybraný typ asynchronního motoru s kotvou nakrátko a odpovídající nepřímý měnič kmitočtu s napětovým meziobvodem.

Simulační modely byly sestaveny v nádstavbové části software Matlab - Simulink verze 7.8.0 pomocí dostupných bloků v integrované knihovně Simulinku s podporou m-file sestavených v samotném Matlabu.

Na zpracovaných simulačních modelech byly postupně odsimulovány potřebné funkční závislosti pro jednotlivé dílčí komponenty pohonu doplněného o sestavené simulační bloky ztrát.

Tím byla ověřena korektnost sestavení a zpracování jednotlivých matematických a simulačních modelů asynchronního motoru, nepřímého měniče kmitočtu a bloků reprezentujících příslušné ztráty. Zároveň byly ověřeny výsledky týkající se výkonových poměrů daného sestaveného pohonu s možností jejich porovnání s pohony s asynchronním motorem napájeným nepřímým měničem kmitočtu, které jsou realizovány v praxi.

Klíčová slova

Asynchronní motor, nepřímý měnič kmitočtu, matematický model, simulační model, simulace, Matlab, Simulink, ztráty v asynchronním motoru, ztráty v nepřímém měniči kmitočtu, výstupní průběhy

Abstract

The objective of this thesis is to present the status of the issue of power relations of a drive with asynchronous engine supplied from an indirect frequency converter with voltage semi-circuit on the basis of the processing and creation of mathematical models and the respective simulations. Individual models were designed within the mentioned drive in two parts. First of all, without consideration of losses, and then after the implementation of the respective mathematical apparatus and simulation blocks with the completion of the respective losses both for the asynchronous engine with short-circuit armature, as well as for the indirect frequency converter. However, other simplifying preconditions were not respected and applied. For the resolution of models and simulations, selected type of asynchronous engines with short-circuit armature and the respective indirect frequency converter with voltage semi-circuit were used.

Simulation models were constructed in the adds part of Matlab-Simulink software, version 7.8.0, by means of blocks available in the integrated Simulink library with the support of m-file created in the Matlab module. On the created simulation models, the necessary functions of dependence for individual components of the drive were gradually simulated and completed with the created simulation blocks of losses.

This verifies the correct creation and the processing of individual mathematical and simulation methods of the asynchronous engine, indirect frequency converter and blocks representing the respective losses. At the same time, results were verified concerning the power relations of the stated constructed drive with the possibility of their comparison with drives with asynchronous engine supplied by indirect frequency converter which are implemented in the practice.

Key Words

Asynchronous Engine, Indirect Frequency Converter, Mathematical Model, Simulation Model, Simulation, Matlab, Simulink, Losses in the Asynchronous Engine, Losses in the Indirect Frequency Converter, Output Courses

Seznam základního použitého označení

Zkratky

AM	asynchronní motor
MK	nepřímý měnič kmitočtu s napět'ovým meziobvodem
NS	napět'ový střídač
PWM	pulsně - šířková modulace

Značky a symboly

$\cos\varphi$	[-]	účinník
$\cos\varphi_k$	[-]	účinník motoru nakrátko
$\cos\varphi_N$	[-]	jmenovitý účinník motoru
$\cos\varphi_0$	[-]	účinník motoru naprázdno
f	[Hz]	jmenovitá frekvence napájecího napětí (při simulaci pohonu)
f_s	[Hz]	vstupní (síťová) frekvence, frekvence statoru motoru
f_r	[Hz]	frekvence rotoru motoru
f_{1MK}	[Hz]	vstupní frekvence měniče kmitočtu
f_{2MK}	[Hz]	výstupní frekvence měniče kmitočtu
f_N	[Hz]	jmenovitá frekvence motoru
f_{sp}	[Hz]	spínací frekvence v měniči kmitočtu
f_{spTyp}	[Hz]	typová spínací frekvence v měniči kmitočtu
$I_{A(1)}$	[A]	amplituda 1. harmonické fázového proudu ve zvolené fázi A
$I_{Aef(1)}$	[A]	efektivní hodnota 1. harmonické fázového proudu ve zvolené fázi A
I_D	[A]	proud v napět'ovém meziobvodu
I_{DTyp}	[A]	typový proud v napět'ovém meziobvodu
I_{Fe}	[A]	proud reprezentující ztráty v železe
I_K	[A]	proud motoru nakrátko
I_M	[A]	proud motoru
I_{MTyp}	[A]	typový proud motoru
I_N	[A]	proud motoru při jmenovitém zatížení
I_{NSTyp}	[A]	typový proud v napět'ovém střídači
I_0	[A]	proud motoru naprázdno
I_r	[A]	proud v rotoru motoru
I_s	[A]	proud ve statoru motoru
I_{UP}	[A]	proud v polovodičových součástkách
I_{UPTyp}	[A]	typový proud v polovodičových součástkách
I_{TypMot}	[A]	typový proud motoru, při kterém je známa hodnota přepínacích ztrát polovodičových součástek
I_{US}	[A]	proud v usměrňovači z napájecí sítě
I_{USTyp}	[A]	typový proud v usměrňovači z napájecí sítě
I_x	[A]	podélná složka proudu motoru (způsobující nabuzení motoru)
I_{xN}	[A]	podélná složka proudu motoru při jmenovitém zatížení
I_y	[A]	příčná složka proudu motoru (vytvářející moment motoru)
I_{yN}	[A]	příčná složka proudu motoru při jmenovitém zatížení
I_μ	[A]	magnetizační proud motoru
I_{2l}	[A]	přepočtený proud motoru na stator
J	[kgm ²]	moment setrvačnosti motoru

$L_{\sigma s}$	[H]	rozptylová indukčnost vinutí statoru
$L_{\sigma r}$	[H]	rozptylová indukčnost vinutí rotoru
$L_{\mu} (L_h)$	[H]	magnetizační indukčnost (vzájemná indukčnost při úhlu $\theta = 0$)
m	[-]	počet fází statoru nebo rotoru
M	[Nm]	moment motoru
M_e	[Nm]	elektromagnetický moment motoru
M_h	[Nm]	moment na hřídeli motoru
M_{Max}	[Nm]	maximální moment motoru
M_N	[Nm]	moment motoru při jmenovitém zatížení
M_{pm}	[Nm]	moment pracovního mechanismu (zatěžovací moment)
M_{Zab}	[Nm]	záběrový moment motoru
M_{Zt}	[Nm]	moment ztrát motoru
n	[ot/min]	otáčky motoru
n_K	[ot/min]	otáčky motoru nakrátko
n_N	[ot/min]	otáčky motoru při jmenovitém zatížení
n_0	[ot/min]	otáčky motoru naprázdno
n_S	[ot/min]	synchronní otáčky
η_N	[%]	účinnost motoru při jmenovitém zatížení (jmenovitá účinnost motoru)
p_p	[-]	počet pólových dvojic - polpárů
P	[W]	výkon motoru
P_l	[W]	příkon motoru
P_{IN}	[W]	příkon motoru při jmenovitém zatížení (jmenovitý příkon motoru)
P_A	[W]	výkon motoru při zatížení v bodě A
P_{Mech}	[W]	výstupní mechanický výkon na hřídeli motoru
P_{MK}	[W]	nejvyšší hodnota výkonu na zátěži měniče kmitočtu (zvolený typový výkon měniče kmitočtu)
P_N	[W]	výkon motoru při jmenovitém zatížení (jmenovitý výkon motoru)
P_{δ}	[W]	výkon motoru přenášený vzduchovou mezerou
P_{US}	[W]	činný výkon usměrňovače
P_{USTyp}	[W]	typový činný výkon usměrňovače
ΔP_A	[W]	ztráty při zatížení v bodě A
ΔP_{AM}	[W]	celkové ztráty v asynchronním motoru
ΔP_{Fe}	[W]	ztráty v magnetickém obvodu motoru (v železe statoru)
ΔP_{FeN}	[W]	ztráty v magnetickém obvodu motoru (v železe statoru) při jmenovitém zatížení
ΔP_{FeH}	[W]	ztráty motoru v železe statoru hysterezní
ΔP_{FeV}	[W]	ztráty motoru v železe statoru vířivými proudy
ΔP_j	[W]	celkové tepelné (Jouleovy) ztráty motoru
ΔP_{jr}	[W]	tepelné (Jouleovy) ztráty ve vinutí rotoru
ΔP_{js}	[W]	tepelné (Jouleovy) ztráty ve vinutí statoru
ΔP_{Kon}	[W]	ztráty konstrukční v měniči kmitočtu
ΔP_K	[W]	ztráty motoru nakrátko
ΔP_M	[W]	ztráty závislé na momentu motoru
ΔP_{Mech}	[W]	ztráty motoru mechanické
ΔP_{MechN}	[W]	ztráty motoru mechanické při jmenovitém zatížení
ΔP_{MK}	[W]	celkové ztráty měniče kmitočtu
ΔP_{MN}	[W]	ztráty závislé na momentu motoru při jmenovitém zatížení
ΔP_N	[W]	ztráty motoru při jmenovitém zatížení
ΔP_{NS}	[W]	celkové ztráty v napěťovém střídači v rámci MK
ΔP_{NSTyp}	[W]	typové ztráty v napěťovém střídači v rámci MK

ΔP_{Pr_NS}	[W]	přepínací ztráty ve střídači napětí v rámci MK
ΔP_{PrTyp_NS}	[W]	typové přepínací ztráty ve střídači napětí v rámci MK
ΔP_{Ved_NS}	[W]	ztráty vedením ve střídači napětí v rámci MK
ΔP_0	[W]	ztráty motoru naprázdno (ztráty nezávislé na momentu)
ΔP_{Prid}	[W]	ztráty motoru přídavné
$\Delta P_{S0} \approx \Delta P_{l\mu}$	[W]	ztráty statoru při chodu motoru naprázdno, ztráty magnetizačním tokem statoru
ΔP_{UP}	[W]	ztráty vlivem úbytků napětí na polovodičových součástkách
ΔP_{UPTyp}	[W]	typové ztráty vlivem úbytků napětí na polovodičových součástkách
ΔP_{δ}	[W]	ztráty ve vzduchové mezeře motoru
ΔP_{US}	[W]	ztráty v usměrňovači
ΔP_{USTyp}	[W]	typové ztráty v usměrňovači
R_{2l}	[Ω]	odpor vinutí rotoru přepočtený na stator
R_C	[Ω]	činný odpor vinutí motoru
R_{Fe}	[Ω]	odpor reprezentující ztráty v železe
R_s	[Ω]	odpor vinutí statoru motoru
S_N	[kVA]	jmenovitý zdánlivý výkon měniče kmitočtu
S_{US}	[kVA]	zdánlivý výkon usměrňovače
s	[-]	skluz
s_N	[-]	jmenovitý skluz
s_{ZV}	[-]	skluz zvratu
s_{ZVN}	[-]	jmenovitý skluz zvratu
T_{sim}	[s]	doba simulace
U_{I-3ef}	[V]	efektivní hodnota trojfázového napájecího sdruženého napětí
$U_{AB(l)}$	[V]	amplituda 1. harmonické sdruženého výstupního napětí z měniče kmitočtu
U_{ABef}	[V]	celková efektivní hodnota sdruženého výstupního napětí (platí pro všechny harmonické)
$U_{ABef(l)} (U_N)$	[V]	efektivní hodnota 1. harmonické sdruženého napětí mezi zvolenými větvemi A - B (jmenovité napájecí napětí motoru)
$U_{Aef(l)} (U_f)$	[V]	efektivní hodnota 1. harmonické fázového napětí (fázové napájecí napětí motoru)
U_{DTyp}	[V]	typové stejnosměrné napětí v meziobvodu měniče
$U_{IN-l} (U_{D-l})$	[V]	stejnoseměrné napětí v meziobvodu měniče kmitočtu
$U_{IN} (U_D)$	[V]	upravené stejnosměrné napětí v meziobvodu měniče
U_K	[V]	napětí motoru nakrátko
U_{2mk}	[V]	výstupní napětí měniče kmitočtu
U_0	[V]	napětí motoru naprázdno
U_S	[V]	napětí statoru motoru
Δu_p	[V]	okamžitý úbytek napětí ve střídači napětí na polovodičových součástkách
T_d	[s]	ochranná doba u tranzistoru (dead time)
X_k	[Ω]	reaktance vinutí nakrátko
$X_{\sigma s}$	[Ω]	rozptylová reaktance vinutí statoru
$X_{\sigma r}$	[Ω]	rozptylová reaktance vinutí rotoru
$X_{\sigma 2l}$	[Ω]	rozptylová reaktance vinutí rotoru přepočtená na stator
$X_{\mu} (X_h)$	[Ω]	magnetizační reaktance (vzájemná reaktance při úhlu $\theta = 0$)
Ψ	[Wb]	magnetický tok motoru
Ψ_N	[Wb]	magnetický tok motoru při jmenovitém zatížení
Ψ_r	[Wb]	magnetický tok rotoru
Ψ_s	[Wb]	magnetický tok statoru

φ	[°]	fázový úhel
ω	[rad/s]	elektrická úhlová rychlost motoru
ω_m	[rad/s]	mechanická úhlová rychlost motoru
ω_k	[rad/s]	všeobecná úhlová rychlost
ω_N	[rad/s]	úhlová rychlost motoru při jmenovitém zatížení
ω_S	[rad/s]	synchronní úhlová rychlost motoru

Úvod	2
1 Základní popis hlavních částí pohonu a teoretický rozbor ztrát v asynchronním motoru a nepřímém měniči kmitočtu	3
1.1 Základní princip činnosti asynchronního motoru a jeho provozní stavy	3
1.2 Zjednodušující předpoklady pro řešení asynchronního motoru	4
1.3 Výkonová bilance ztrát v asynchronním motoru	4
1.4 Základní specifikace a popis ztrát asynchronního motoru	5
1.5 Teoretický rozbor hlavních druhů ztrát v asynchronním motoru	6
1.5.1 Ztráty v asynchronním motoru při jiných než jmenovitých vstupních veličinách	9
1.5.2 Ztráty v asynchronním motoru při frekvenčním řízení	10
1.6 Asynchronní motor s rozložením jednotlivých ztrát	12
1.7 Úplné náhradní schéma asynchronního motoru	12
1.8 Základní sestava a princip činnosti nepřímého měniče kmitočtu s napětovým meziobvodem	13
1.9 Zjednodušující předpoklady pro řešení nepřímého měniče kmitočtu	14
1.10 Základní specifikace a popis ztrát nepřímého měniče kmitočtu	14
1.11 Teoretický rozbor hlavních druhů ztrát napětového střídače v rámci měniče kmitočtu	15
1.11.1 Jednotlivé ztráty a účinnost měniče kmitočtu v různých provozních stavech	16
1.11.2 Rozdělení ztrát měniče kmitočtu dle jeho dílčích komponentů	17
1.11.3 Určení proudu v napětovém střídači	18
1.12 Vstupní neřízený usměrňovač a stejnosměrný napětový meziobvod	19
1.13 Nepřímý měnič kmitočtu v nevýbušném provedení s popisem jeho základních částí	20
1.14 Základní zapojení nepřímého měniče kmitočtu s napětovým meziobvodem	21
2 Sestavení matematického a simulačního modelu jednotlivých částí pohonu bez uvažování ztrát a doplnění hlavních částí pohonu o příslušné simulační bloky ztrát	22
2.1 Matematický model asynchronního motoru bez uvažování ztrát	22
2.1.1 Matematický model motoru v obecném souřadnicovém systému	26
2.1.2 Tokový model asynchronního motoru	27
2.2 Řešení modelu asynchronního motoru, u kterého je od výrobce k dispozici protokol o typové zkoušce motoru a šítkové hodnoty motoru	31
2.2.1 Parametry asynchronního motoru	31
2.2.2 Výpočet parametrů motoru z jeho šítkových hodnot a na základě výsledků typové zkoušky motoru	32
2.3 Specifikace základních parametrů pro varianty momentů pracovního mechanismu a výstupní frekvence z řídicího bloku pro asynchronní motor a měnič kmitočtu	34
2.4 Simulační bloky hlavních ztrát asynchronního motoru	35
2.5 Simulační model bloku řídicího napětí	35
2.6 Matematický model nepřímého měniče kmitočtu bez uvažování ztrát	35
2.7 Dimenzování měniče kmitočtu pro jeho jmenovité parametry	37
2.7.1 Dimenzování součástek měniče kmitočtu	37
2.8 Výpočet hlavních ztrát měniče kmitočtu pro sestavení jeho simulačních bloků ztrát	40
2.9 Simulační bloky hlavních ztrát napětového střídače v rámci měniče kmitočtu	43
2.10 Základní simulační model sestavy pohonu s asynchronním motorem napájeným z měniče kmitočtu se simulačními bloky ztrát	43
3 Simulační ověření výkonových poměrů pohonu s doplněním simulačních bloků ztrát	45
3.1 Varianty zvolených průběhů momentu pracovního mechanismu	45
3.2 Varianty průběhů řídicího napětí se zvolenou hodnotou frekvence	45
3.3 Celkové simulační schéma asynchronního motoru napájeného z měniče kmitočtu pro zvolené hodnoty zatěžovacího momentu a pro zvolené hodnoty frekvence řídicího napětí	46
3.4 Jednotlivé průběhy a hodnoty ztrát v rámci daného pohonu (pro <i>Mpm-0</i> a <i>f-50</i>)	47
3.5 Jednotlivé průběhy a hodnoty ztrát v rámci daného pohonu (pro <i>Mpm-322</i> a <i>f-50</i>)	51

3.6	Jednotlivé průběhy a hodnoty ztrát v rámci daného pohonu (pro <i>Mpm-644</i> a <i>f-50</i>)-----	55
3.7	Průběhy a porovnání celkových ztrát AM, NS a v pohonu v závislosti na velikosti zatěžovacího momentu <i>Mpm</i> (<i>Mpm-0</i> , <i>Mpm-322</i> , <i>Mpm-644</i>) pro frekvenci <i>f</i> (<i>f-50</i>)-----	59
3.8	Jednotlivé průběhy a hodnoty ztrát v rámci daného pohonu (pro <i>Mpm-0</i> a <i>f-25</i>)-----	62
3.9	Jednotlivé průběhy a hodnoty ztrát v rámci daného pohonu (pro <i>Mpm-322</i> a <i>f-25</i>)-----	66
3.10	Jednotlivé průběhy a hodnoty ztrát v rámci daného pohonu (pro <i>Mpm-644</i> a <i>f-25</i>)-----	70
3.11	Průběhy a porovnání celkových ztrát AM, NS a v pohonu v závislosti na velikosti zatěžovacího momentu <i>Mpm</i> (<i>Mpm-0</i> , <i>Mpm-322</i> , <i>Mpm-644</i>) pro frekvenci <i>f</i> (<i>f-25</i>) -----	74
3.12	Porovnání celkových ztrát AM, NS a v pohonu v závislosti na velikosti všech zvolených hodnot zatěžovacího momentu <i>Mpm</i> a řídicích napětí se zvolenou hodnotou frekvence -----	77
3.13	Porovnání výsledků typové zkoušky týkající se ztrát vybraného asynchronního motoru typu HVM 280M-4 s výsledky z příslušných simulací-----	79
3.14	Příklady výpočtů vybraných ztrát asynchronního motoru a napětového střídače a jejich porovnání s hodnotami ze simulací-----	80
3.15	Výpočet procentuálního rozložení jednotlivých ztrát AM pro jmenovité nastavené parametry---	80
3.16	Celkové zhodnocení odsimulovaných průběhů a zobrazených hodnot příslušných ztrát-----	81

Závěr-----	82
-------------------	-----------

Seznam použitých zdrojů-----	83
-------------------------------------	-----------

Přílohy-----	84
---------------------	-----------

Úvod

V současné době technického rozmachu se stále více uplatňují střídavé pohony osazené asynchronními motory. Jsou ekonomicky výhodnější, jednodušší a s menšími nároky na údržbu ve srovnání s motory stejnosměrnými. Ve všech aplikacích pohonů se střídavými motory je řešeno a vyhodnocováno řízení těchto elektromotorů a rovněž jejich chování v různých provozních stavech. Zmíněné řízení je možno řešit například pomocí klasického softstartéru s napěťovou rampou nebo častěji použitím pokročilých tranzistorových nebo tyristorových měničů (např. pomocí nepřímého měniče kmitočtu s napěťovým meziobvodem - MK). Je nutno si uvědomit, že v jednotlivých částech (komponentech) pohonu - např. elektromotor, měnič kmitočtu - vznikají různé druhy ztrát a je zapotřebí je řádně specifikovat, provést jejich rozbor a v potřebné míře je v rámci jednotlivých bloků ztrát doplnit do jednotlivých matematických a simulačních modelů při realizaci výsledného pohonu.

Před samotnou realizací navrhovaného pohonu je vhodné, a často také nutné si jednotlivé dílčí komponenty a vzájemné závislosti předem odměřit, provést potřebné simulace a teprve poté přistoupit ke konečné praktické realizaci daného pohonu. V provozní praxi totiž není ve většině případů možnost sledovaný pohon na určitou dobu vypnout a provést potřebná měření a nastavení, poněvadž jejich vypnutí by mohlo způsobit ekonomické problémy v daném provozu nebo ve výrobě. Proto je výhodné a také žádoucí řešit již ve stádiu návrhu pohonu provedení podrobného matematického zpracování a softwarové simulace dle konkrétních stanovených podmínek a provozních potřeb.

Základem této diplomové práce je vytvoření a následné zpracování potřebných matematických a simulačních modelů asynchronního motoru a nepřímého měniče kmitočtu s napěťovým meziobvodem. Nejprve bez jednotlivých ztrát a poté s doplněním příslušných bloků ztrát s následnými simulacemi v softwarovém prostředí Matlab – Simulink. Aby bylo možno sestavit a následně řešit příslušné modely, je nutno znát nejen základní, ale rovněž podrobnější parametry dílčích komponentů daného pohonu od výrobce nebo dodavatele. V této diplomové práci bude řešen konkrétní sestavený pohon osazený konkrétním vybraným asynchronním motorem o jmenovitém výkonu 100 kW na napětí 1000 V, který je napájený ze zvoleného nepřímého měniče kmitočtu s napěťovým meziobvodem o nejvyšším výkonu 150 kW (v daném případě se jedná o zvolený typový výkon tohoto měniče kmitočtu) na napětí 1000 V.

Základní princip činnosti asynchronního motoru a nepřímého měniče kmitočtu, specifikace a rozbor jednotlivých ztrát v elektromotoru a v nepřímém měniči kmitočtu, potřebná náhradní schémata a základní schéma jednotlivých komponentů pohonu jsou obsahem první kapitoly.

Ve druhé kapitole je provedeno zpracování a sestavení matematického modelu AM a nepřímého měniče kmitočtu bez uvažování ztrát poté s doplněním simulačních bloků reprezentujících příslušné ztráty. Následně jsou na základě výsledků zpracovány a sestaveny odpovídající simulační modely.

Ve třetí kapitole je provedeno simulační ověření výkonových poměrů pohonu sestávajícího s asynchronního motoru napájeného z nepřímého měniče kmitočtu. Daný pohon je ověřen s doplněním simulačních bloků reprezentujících příslušné hlavní ztráty. Zpracování výsledků je realizováno v software Matlab - Simulink a doplněno o příslušné grafické závislosti v programu Excel. A to včetně porovnání a celkového zhodnocení odsimulovaných průběhů.

V závěru této diplomové práce je provedena rekapitulace postupů, metod a výsledků s výčtem možných přínosů do provozní praxe.

1 Základní popis hlavních částí pohonu a teoretický rozbor ztrát v asynchronním motoru a nepřímém měniči kmitočtu

1.1 Základní princip činnosti asynchronního motoru a jeho provozní stavy [1]

Asynchronní motor je točivý elektrický stroj, jehož magnetický obvod je malou mezerou rozdělen na dvě části: stator motoru se svým vinutím a rovněž rotor motoru se svým vinutím. Statorové vinutí je připojeno na zdroj střídavého napětí, rotorové vinutí je zpravidla spojeno nakrátko a proud v něm vzniká elektromagnetickou indukcí, podobně jako u transformátoru. Za základě těchto poznatků vznikl i další název pro obecný elektromotor – indukční stroj. Trojfázový elektromotor je z hlediska konstrukce poměrně jednoduchý, v provozu spolehlivý a nevyžaduje téměř žádnou zvláštní obsluhu a údržbu. Vyrábí se v širokém rozsahu výkonů, a to od několika wattů až do několika desítek megawattů.

Princip činnosti asynchronního motoru je založen na využití točivého magnetického pole. Statorové vinutí motoru je napájeno třífázovým střídavým napětím, které v něm vyvolává souměrný střídavý proud. Protékající třífázový proud generuje ve statoru točivé elektromagnetické pole. Toto pole rotuje (otáčí se) synchronní úhlovou rychlostí ω_s . Tato synchronní rychlost je úměrná synchronním otáčkám n_s , které závisí jednak na frekvenci f napájecího napětí asynchronního motoru a jednak na počtu pólových dvojic (pólů) p_p . Rotující elektromagnetické pole indukuje indukované napětí do vodičů rotorového vinutí nakrátko. Toto indukované napětí vyvolá v klecovém vinutí rotoru asynchronního motoru elektrický proud.

Asynchronní stroj může pracovat jako klasický elektromotor, generátor nebo brzda. Přechod z jednoho stavu do druhého stavu je plynulý. Pracovní stav asynchronního stroje nejlépe vyjadřuje skluz, a to jak svoji velikostí, tak také svým znaménkem.

Pokud by se rotor motoru otáčel stejnou rychlostí jako magnetické pole ve vzduchové mezeře (tedy synchronními otáčkami), nevznikne v elektromotoru vzájemný pohyb mezi jeho rotorem a točivým magnetickým polem. V tomto případě skluz $s = 0$ a také frekvence rotoru $f_r = 0$. Ve vodičích rotoru se neindukuje elektromotorická síla a neprotéká jimi elektrický proud. Motor nevyvíjí žádný moment. Jedná se o **ideální chod motoru naprázdno**. Ve skutečnosti motor při chodu naprázdno musí hradit mechanické ztráty (tření v ložiskách, ventilační ztráty), a proto je motor vždy zatížen určitým momentem odpovídajícím těmto ztrátám. Skutečný motor tedy nemůže nikdy dosáhnout synchronní rychlosti. Vznikají při chodu motoru naprázdno rovněž úbytky napětí na vinutích a ztráty v mědi (Joulovy ztráty) a v železe.

Chod motoru nakrátko nastává v případě, kdy se rotor motoru neotáčí (skluz $s = 1$ a otáčky $n = 0$).

U asynchronního motoru je rozptyl mnohem větší než u transformátoru, protože je větší magnetický odpor obvodu. U motoru je magnetický obvod i vzduchové mezery. Téměř všechen tok je při stavu motoru nakrátko rozptylový, protože pouze menší část je potřebná na indukci elektromotorické síly (je potřebná pouze na překonání úbytků napětí na činném odporu vinutí a jeho reaktanci). Proud nakrátko bývá zpravidla $5 \div 8$ násobek jmenovitého proudu motoru.

Mezi stavem motoru naprázdno a nakrátko se nachází **provozní stav motoru**.

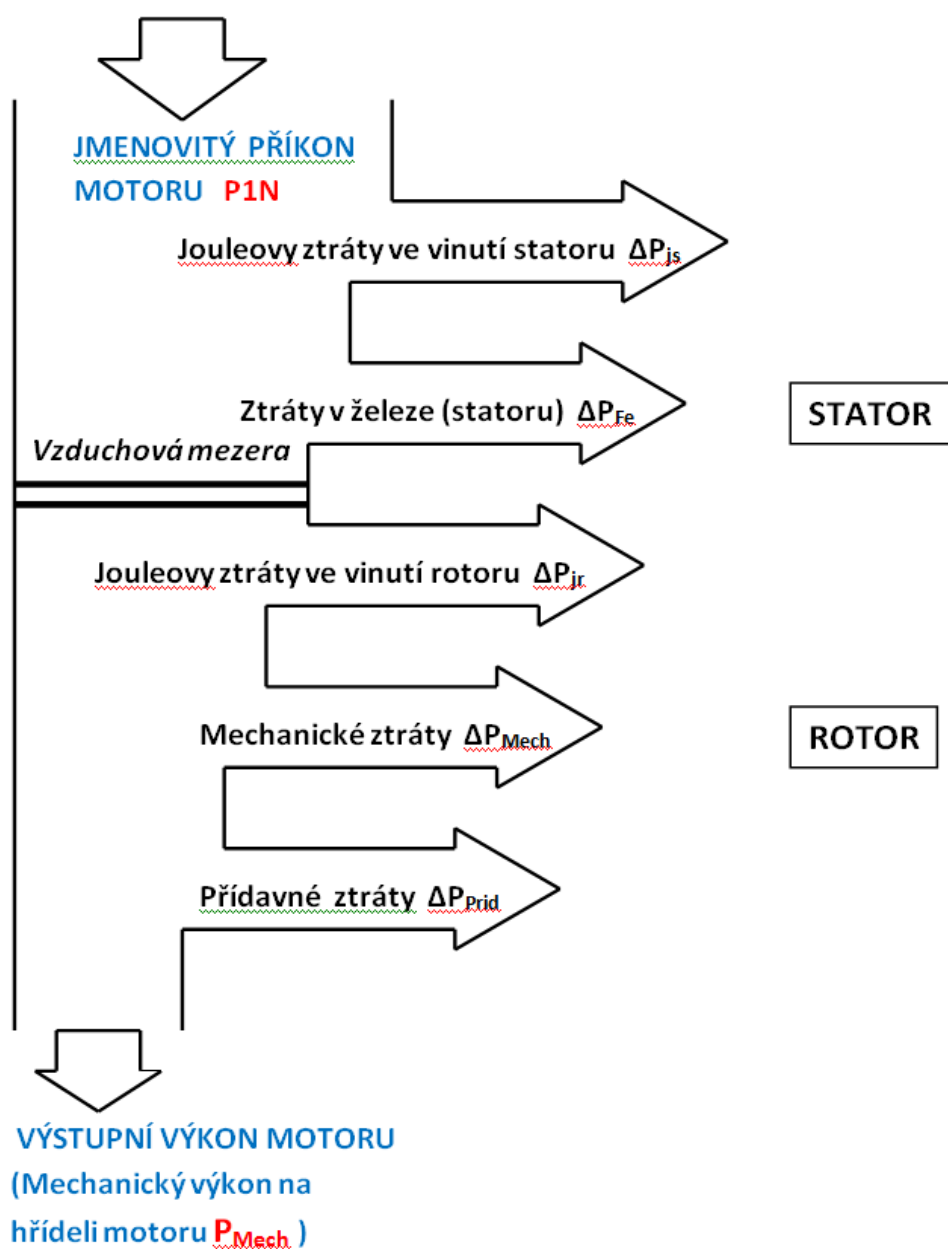
Zatížený motor musí mít určitou hodnotu skluzu, aby napětí indukované v rotoru vyvolalo proud, který spolu s točivým magnetickým polem vytvoří moment motoru na jeho hřídeli. Otáčky motoru jsou pak v rozmezí $0 \leq n \leq n_N$ a skluz motoru v rozmezí $1 \geq s \geq 0$.

1.2 Zjednodušující předpoklady pro řešení asynchronního motoru [1]

V této diplomové práci budou pro řešení vybraného asynchronního motoru bez uvažování vlivu ztrát a s implementací vybraných druhů ztrát vždy respektovány a uplatněny následující zjednodušující předpoklady:

1. Asynchronní motor je symetrický, jeho vinutí je sinusově rozloženo po obvodu stroje a vzduchová mezera je konstantní
2. Odpory a indukčnosti jsou ve všech fázích stejné a mají konstantní hodnotu, tzn. zanedbávají se:
 - změny odporů na teplotě
 - nasycení magnetického obvodu
 - hystereze magnetického obvodu
 - změny odporů a indukčností na kmitočku (skinefekt)
3. Nulový vodič není připojen

1.3 Výkonová bilance ztrát v asynchronním motoru



Obr. 1 – Výkonová bilance ztrát AM

Základní výkonové rozložení v asynchronním motoru:

Vztah pro mechanický výkon na hřídeli motoru s ohledem na jednotlivé ztráty AM

$$P_{Mech} = P_{1N} - \Delta P_{js} - \Delta P_{jr} - \Delta P_{Fe} - \Delta P_{Mech} - \Delta P_{Prld} \quad (1.1)$$

Celkové Jouleovy ztráty asynchronního motoru

$$P_J = P_{js} + \Delta P_{jr} \quad (1.2)$$

Celkové ztráty asynchronního motoru

$$\Delta P_{AM} = \Delta P_j + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Mech} + \Delta P_{Prld} \quad (1.3)$$

Platí základní vztah pro příkon motoru

$$P_{1N} = P_{Mech} + \Delta P_{AM} \quad (1.4)$$

Výkon ve vzduchové mezeře motoru (je to rovněž výkon ztracený na fiktivním odporu R_{21}/s)

$$P_\delta = \frac{3 \cdot R_{21} \cdot I_{21}^2}{s} \quad (1.5)$$

Proud rotoru přepočítaný na stator

$$P_\delta = \frac{3 \cdot R_{21}}{s} \cdot \frac{U_f^2}{\left(R_1 + \frac{R_{21}}{s}\right)^2 + (X_K)^2} \quad \left[I_{21} = \frac{U_f}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_{21}}{s}\right)^2 + (X_K)^2}} \right] \quad (1.6a,b)$$

Vztah pro výpočet momentu ztrát

$$M_{zt} = \frac{\Delta P}{\omega_m} \quad (1.7)$$

Mechanický výkon na hřídeli motoru ve vztahu k momentu na hřídeli a mech. úhlové rychlosti

$$P_{Mech} = M_h \cdot \omega_m \quad (M_h = M_e - M_{zt}) \quad (1.8a,b)$$

1.4 Základní specifikace a popis ztrát asynchronního motoru [3]

Snížování spotřeby elektrické energie vede k tomu, že je stále větší snaha o zvyšování účinnosti indukčních strojů. U elektrických motorů je tato jejich činnost dána poměrem mezi mechanickým výkonem na hřídeli motoru a elektrickým příkonu přiváděného do motoru. Rozdíl mezi tímto příkonem a výkonem jsou ztráty, které je nutno, pokud možno, co nejvíce omezit.

V elektromotorech vzniká několik druhů ztrát, a to ztráty elektrické, ztráty v magnetickém obvodu statoru, ztráty mechanické, ztráty přídavné, ztráty magnetickém obvodu rotoru a další ztráty, které se obvykle zanedbávají. Především se však v provozní praxi řeší a sledují ztráty elektrické, ztráty v magnetickém obvodu (ztráty v železe) statoru a ztráty mechanické. Odborným odhadem se ve většině případů řeší na základě praktických zkušeností i ztráty přídavné. Uvedené hlavní druhy ztrát budou tedy podrobeny rozboru a implementovány do příslušných zpracovaných modelů ztrát.

a) Ztráty elektrické

Tyto ztráty vznikají především ve vinutí statoru a rotoru a jsou zapříčiněny procházejícím proudem. Celkově jsou elektrické ztráty určeny délkou vinutí, počtem závitů, měrným odporem použitého materiálu vinutí a proudovou hustotou v daných vodičích. Ze známých vztahů je známo, že při průchodu proudu daným vodičem se vodič postupně otepluje a vznikají určité ztráty. Tyto ztráty se nazývají Jouleovy ztráty ve statoru a rotoru daného motoru.

Odpor vodiče je závislý na teplotě - roste úměrně s rostoucí teplotou. Tím se také zvyšují ztráty na vinutí a rovněž proud vinutím. Jelikož se vinutí kvůli špatnému přístupu chladícího vzduchu špatně

chladí, vznikají takto nežádoucí velikost příslušných ztrát. Řešením by bylo použití supravodivých materiálů, ale ty jsou prozatím velmi drahé a v daných podmínkách obtížně realizovatelné. Na rotoru by bylo rovněž možno odpor vinutí snížit použitím silnějších vodičů nebo změnou rozměrů kruhových zakončení vodičů v případě rotoru nakrátko, ale překážkou je omezený prostor v tělese elektromotoru.

b) Ztráty v železe statoru

Ztráty v železe statoru daného elektromotoru tvoří ztráty magnetizační (tzv. hysterezní) a ztráty vířivými proudy. Hysterezní ztráty se uplatňují při opakovaném přemagnetování feromagnetického materiálu a jsou úměrné ploše hysterezní smyčky. Ztráty vířivými proudy vznikají naindukováním napětí v železném obvodu motoru, který umožňuje průchod proudu díky existující uzavřené cestě. Vířivé proudy jsou kolmé na směr magnetického toku. Celkově jsou ztráty v železe závislé na magnetické indukci, frekvenci a hysterezní materiálové konstantě. Z důvodu nelineárních charakteristik materiálů magnetického obvodu je určení ztrát v železe poměrně obtížné. Magnetický obvod asynchronního motoru se skládá z navzájem izolovaných a k sobě lisovaných plechů. Jednou z možností omezení vířivých proudů je použití plechů z tenšího a kvalitnějšího materiálu, ale na úkor větší náročnosti výroby.

c) Ztráty mechanické

- ventilační ztráty

jsou způsobené rotačním pohybem, např. použitého ventilátoru na chlazení elektromotoru, který se otáčí kolem své osy. Tyto ztráty je možno změřit poměrně jednoduše, ale pouze pomocí dynamometru. Jinak se používá zpravidla pouze odhad těchto ztrát.

- ztráty třením

vyskytují se v motoru jednak v ložiskách, a jednak jsou způsobeny třením rotoru o vzduch. Ztráty v ložiskách jsou při zaběhnutém motoru a při stálém zatížení a stálé teplotě lineárně závislé na otáčkách daného motoru.

d) Ztráty přídavné

Přídavné ztráty bývají nejčastěji způsobovány rozptylovými toky prostorových harmonických, pulzací magnetického toku nebo nerovnoměrnostmi ve vzduchové mezeře motoru. Jsou to tedy ztráty od vyšších harmonických složek napětí nebo proudu, které zvětšují ztráty ve vinutích a také v některých částech magnetického obvodu. Jsou závislé na velikosti harmonických složek. Při harmonických průbězích vstupních veličin se tento druh ztrát neobjevuje.

1.5 Teoretický rozbor hlavních druhů ztrát v asynchronním motoru [4]

Tyto druhy ztrát jsou při provozu asynchronního motoru mimo jiné také závislé na teplotě - v dalším rozboru a řešení jednotlivých druhů ztrát bude pro zjednodušení předpoklad ustálené teploty.

a) Ztráty ve vinutích motoru - tzv. Joulovy ztráty (ΔP_j)

(u tohoto druhu ztrát existuje kvadratická závislost na proudu motoru)

$$\Delta P_j = m \cdot (R_S + R_{21}) \cdot I_M^2 = m \cdot R_C \cdot I_M^2 \quad (1.9)$$

Rozdělení Joulových ztrát:

- ztráty motoru ve vinutích statoru (ΔP_{js})

(platí u těchto ztrát kvadratická závislost na proudu statoru I_S)

$$\Delta P_{js} \approx I_S^2 \quad \Delta P_{js} = m \cdot R_S \cdot I_S^2 \quad (1.10)$$

- ztráty motoru ve vinutích rotoru (ΔP_{jr})

(rovněž platí kvadratická závislost na odpovídajícím proudu – zde na proudu rotoru I_r)

$$\Delta P_{jr} \approx I_r^2 \quad \Delta P_{jr} = m \cdot R_{21} \cdot I_r^2 \quad (1.11)$$

Pro výpočet efektivní hodnoty proudu v rotoru a statoru (zde pro uvažovaný systém α, β) je možno použít následující vztahy, které vycházejí ze vztahu pro velikost (amplitudu) příslušného proudu. Obecně je dále daná problematika rozepsána v kapitole 1.11.3.

$$I_s = \left[\sqrt{(i_{s\alpha})^2 + (i_{s\beta})^2} \right] / \sqrt{2} \quad I_r = \left[\sqrt{(i_{r\alpha})^2 + (i_{r\beta})^2} \right] / \sqrt{2} \quad (1.12a,b)$$

$i_{s\alpha}$ je složka α statotového proudu

$i_{s\beta}$ je složka β statotového proudu

$i_{r\alpha}$ je složka α rotorového proudu

$i_{r\beta}$ je složka β rotorového proudu

Při chodu motoru naprázdno se většinou počítají pouze ztráty ve vinutí statoru (ΔP_{S0})

b) Ztráty v magnetickém obvodu motoru - ztráty v železe (ΔP_{Fe})

Rozhodující jsou ztráty v železe statoru, poněvadž v železe rotoru bývá často minimální skluzová frekvence a magnetický tok o velmi malém kmitočtu - tyto ztráty v rotoru se tedy zanedbávají.

$$\Delta P_{Fe} \approx \psi_s^2 \cdot f^\alpha = \psi_s \cdot K \cdot f^\alpha \quad [\alpha \cong 1,4 \text{ až } 1,6 \quad K \cong 1 \text{ až } 1,5] \quad (1.13)$$

α = mocněnec, který je kompromisem mezi první a druhou mocninou (zvolená hodnota 1,6)

K = konstanta pro ztráty v železe (zvolená hodnota 1,1)

Rozdělení ztrát v železe:

- ztráty hysterezní ve statoru (ΔP_{FeH})

(tyto ztráty jsou úměrné kmitočtu a kvadrátu magnetického toku)

$$\Delta P_{FeH} \approx \psi_s^2 \cdot f \quad (1.14)$$

- ztráty vířivé ve statoru (ΔP_{FeV})

(tyto ztráty jsou úměrné kvadrátu kmitočtu i kvadrátu magnetického toku)

$$\Delta P_{FeV} \approx \psi_s^2 \cdot f^2 \quad (1.15)$$

c) Ztráty motoru mechanické (ΔP_{Mech})

Jsou to jednak ztráty třením v ložiskách (tyto ztráty jsou lineárně úměrné rychlosti) a jednak ztráty aerodynamické (tyto ztráty jsou úměrné třetí mocnině rychlosti).

Při pomalém pohybu převládají ztráty třecí, při rychlém pohybu ztráty aerodynamické.

$$\Delta P_{Mech.} = C_1 \cdot \omega^1 + C_2 \cdot \omega^3 = c_1 \cdot f^1 + c_2 \cdot f^3 \quad (1.16)$$

C_1, C_2, c_1, c_2 jsou dílčí konstanty na základě odborných odhadů dle provozních zkušeností

Mechanické ztráty motoru jsou sice závislé na otáčkách motoru (jeho úhlové rychlosti), ale rovněž také na jeho mechanických rozměrech (především se pro určení mechanických ztrát motoru používá hodnota vnějšího průměru statoru).

1) Vztah pro motory s vnějším ofukováním

$$\Delta P_{Mech.} \approx K_T \cdot \left(\frac{n}{10} \right)^2 \cdot D_s^4 = K_T \cdot \left(\frac{\omega \cdot \frac{30}{10}}{\pi} \right)^2 \cdot D_s^4 \quad (1.17)$$

K_T je konstanta (pro 4 pólové motory platí: $K_T = [1,3 \cdot (1 - D_s)]$)

D_s je vnější průměr statoru motoru

2) Vztah pro motory s axiální ventilací

$$\Delta P_{Mech.} \approx K_T \cdot \left(\frac{n}{1000} \right)^2 \cdot (10 \cdot D_S)^3 = K_T \cdot \left(\frac{\omega \cdot \frac{30}{\pi}}{1000} \right)^2 \cdot (10 \cdot D_S)^3 \quad (1.18)$$

K_T je konstanta (pro 4 pólové motory a $D_S \geq 0,25\text{m}$ platí: $K_T = 7$)

D_S je vnější průměr statoru motoru

V této práci bude pro vybraný AM použit vztah platný pro motory s axiální ventilací.

d) Ztráty motoru přídavné (ΔP_{Prid})

Ztráty přídavné bývají dle provozních zkušeností a výpočtů zhruba ve výši 0,5 až 1,5 % příkonu příslušného asynchronního motoru při jmenovitém zatížení. V této práci byla výše přídavných ztrát zvolena na úrovni přibližně 1 % jmenovitého příkonu motoru (zvolena konstantní hodnota 1000 W). Vzhledem k omezeným dostupným informacím zabývajících se podrobněji přídavnými ztrátami motoru bylo přistoupeno ke zjednodušení a nastavení dané hodnoty bez ohledu na velikost zatěžovacího momentu pro motor a výstupní frekvenci.

Často se v praxi tyto ztráty určují z naměřených hodnot při zkoušce motoru naprázdno a zkoušce motoru nakrátko.

Obecně

$$\Delta P_{Prid} = 0,005 \text{ až } 0,015 \cdot P_{1N} \quad (1.19)$$

Získat jednotlivé druhy ztrát výpočtem je v lepším případě určitá aproximace. Jednotlivými typy měření na motorech je možno získat pouze údaje o určitých kombinacích uvedených druhů ztrát. Avšak i tyto údaje, které platí pro určitý provozní stav motoru, umožňují pouze odhadnout ztráty pro další provozní stavy motoru.

Pokud jsou k dispozici údaje při jmenovitém chodu motoru, tj. údaje při napájení motoru jmenovitým napětím a jmenovitým kmitočtem a při zatížení na hřídeli jmenovitým momentem (motor má při těchto podmínkách jmenovitou rychlost), je možno pomocí ztrát naprázdno určit vztah a poté vypočítat ztráty při jmenovitém zatížení (jmenovité ztráty) a také jmenovitou účinnost motoru.

Ztráty motoru naprázdno (ΔP_0)

$$\Delta P_0 = \Delta P_{S0} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Mech.} \quad (1.20)$$

Účinnost η má své maximum v bodě označeném A (tj. při výkonu P_A a rychlosti ω_A , která je blízko jmenovité rychlosti ω_N ($\omega_A = 0,7 \text{ až } 1,0 \omega_N$))

Při výkonu P_A vznikají ztráty ΔP

Na základě úvahy, že největší účinnosti bude dosaženo tehdy, když bude nejmenší poměr $\frac{\Delta P}{P}$,

se dá odvodit vztah:

$$\Delta P_0 = \frac{1}{2} \cdot \Delta P_A \quad (1.21)$$

Platí:

- a) Rozdělení ztrát na složku ztrát naprázdno, které jsou konstantní (ΔP_0) a složku ztrát při zatížení ($k \cdot P^2$) - jedná se o Joulovy ztráty, které jsou kvadraticky závislé na zatížení

$$\Delta P = \Delta P_0 + k \cdot P^2 \quad (1.22)$$

- b) Vztah ztrát naprázdno a zatížení v bodě A:

$$\Delta P_0 = k \cdot P_A^2 \Rightarrow k = \frac{\Delta P_0}{P_A^2} \quad (1.23)$$

Ztráty v bodě A:

$$\Delta P_A = \Delta P_0 + k \cdot P_A^2 = \Delta P_0 + \left(\frac{\Delta P_0}{P_A^2} \right) \cdot P_A^2 = 2 \cdot \Delta P_0 \quad (1.24)$$

c) Ztráty při jmenovitém zatížení:

$$\Delta P_N = \Delta P_0 + k \cdot P_N^2 = \Delta P_0 + \left(\frac{\Delta P_0}{P_A^2} \right) \cdot P_N^2 = \Delta P_0 \cdot \left[1 + \left(\frac{P_N}{P_A} \right)^2 \right] \quad (1.25)$$

d) Poměr ztrát naprázdno ke ztrátám při jmenovitém zatížení:

$$\frac{\Delta P_0}{\Delta P_N} = \frac{1}{1 + \left(\frac{P_N}{P_A} \right)^2} \cdot \frac{\left(\frac{P_A}{P_N} \right)^2}{\left(\frac{P_A}{P_N} \right)^2} = \frac{\left(\frac{P_A}{P_N} \right)^2}{1 + \left(\frac{P_A}{P_N} \right)^2} \quad (1.26)$$

Ze znalosti poměru těchto ztrát lze zase naopak stanovit, při jakém výkonu P_A je nejvyšší účinnost.

Platí, že ztráty motoru při jmenovitém zatížení (ΔP_N) jsou dány jmenovitou účinností motoru (η_N):

$$\Delta P_N = P_N \cdot \frac{1 - \eta_N}{\eta_N} \quad (1.27)$$

1.5.1 Ztráty v asynchronním motoru při jiných než jmenovitých vstupních veličinách [4]

Mimo ztrát, které jsou vyvolány základním napájecím napětím a proudy, vytváří nesinusové napájení motoru z měniče kmitočtu přídavné ztráty v motoru. Tyto ztráty závisí jak na otáčkách, tak také na napětí, proudu, na tvaru výstupního napětí měniče kmitočtu a v neposlední řadě na konstrukčním provedení a velikosti daného motoru. Důsledkem spínání výstupu je napětí ideálního tvaru doprovázeno kvazi pravoúhlým napětím se strmým sklonem a přibližně konstantní amplitudou. Toto „impulsní napětí“ je díky svému charakteru téměř nezávislé na otáčkách, proudu a rovněž na magnetickém toku motoru.

Přídavné ztráty v magnetickém obvodu (přídavné ztráty v železe) závisí jak na amplitudě, tak především na kmitočtu harmonických fázových napětí.

V případě napájení motorů měniči kmitočtu proudového charakteru existuje další druh ztrát v železe, tzv. komutační ztráty. Při napájení motorů měniči kmitočtu s napěťovým meziobvodem k těmto komutačním ztrátám nedochází, protože komutační proudy danými vinutími motoru neprocházejí.

V případě použití těchto měničů kmitočtu je rozptylová reaktance nejdůležitější konstrukční charakteristikou, protože tato reaktance omezuje proudy harmonických, které jsou příčinou těchto ztrát. Přídavné ztráty jsou u těchto měničů nezávislé na zatížení.

Pro výpočet přídavných ztrát v motoru není k dispozici žádná klasická jednoduchá metoda, protože závislost tohoto druhu ztrát na různých fyzikálních veličinách je poměrně složitá.

Aby se mohly vyhodnotit jednotlivé ztráty motoru při jiných než vstupních veličinách (např. při jiných jmenovitých rychlostech, napětích, kmitočtech), je zapotřebí alespoň odhad rozdělení ztrát naprázdno ΔP_0 .

$$\Delta P_0 = \Delta P_{I\mu} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Mech} \quad (1.28)$$

Odhad složky $\Delta P_{I\mu}$ od magnetizačního proudu je možno řešit pomocí vektorového diagramu, ve kterém se proud statoru a rotoru dělí na příčnou složku I_r , která vytváří moment (rovněž činný výkon

motoru), a podélnou složku I_x , jejíž velkou část tvoří magnetizační proud I_μ a malou část způsobují rozptylová pole.

Jestliže je s dostatečnou přesností určeno, že $I_\mu \approx I_x = I_s \cdot \sin \varphi$ a $I_y = I_s \cdot \cos \varphi$, pak platí:

$$\Delta P_{1\mu} \approx 3 \cdot R_s \cdot I_x^2 = 3 \cdot R_s \cdot I_{SN}^2 \cdot \sin^2 \varphi_N \quad (1.29)$$

$$\Delta P_N - \Delta P_0 \approx (R_s + R_{21}) \cdot I_y^2 = 3 \cdot (R_s + R_{21}) \cdot I_{SN}^2 \cdot \cos^2 \varphi_N \quad (1.30)$$

$$\frac{\Delta P_{1\mu}}{\Delta P_0} = \frac{\Delta P_{1\mu}}{\Delta P_N - \Delta P_0} \cdot \frac{\Delta P_N - \Delta P_0}{\Delta P_0} = \frac{R_s}{R_s + R_{21}} \cdot \left(\frac{\Delta P_N}{\Delta P_0} - 1 \right) \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi_N \quad (1.31)$$

1.5.2 Ztráty v asynchronním motoru při frekvenčním řízení [4]

Předpokladem níže uvedeného kompletního rozboru ztrát při frekvenčním řízení bude napájení AM z nepřímého měniče kmitočtu s napěťovým meziobvodem s dokonalou PWM.

Řízením motoru dosahujeme jeho požadovaný točivý moment M a požadovanou rychlost ω . Pro jednodušší pochopení a řešení je za řízenou rychlost považována rychlost ω_s točivého magnetického toku, která je úměrná napájecí frekvenci f .

Celý rozsah řízení rychlosti se dělí na dolní rozsah řízení a horní rozsah řízení (tzv. řízení odbuzováním).

Ztráty ΔP zde platí pro ustálený stav motoru.

a) Dolní rozsah řízení ($\omega < \omega_N$): V tomto rozsahu řízení je udržován konstantní magnetický tok

1) Ztráty naprázdno ΔP_θ (ztráty nezávislé na momentu motoru)

$$\Delta P_0 = \Delta P_{1\mu} + (\Delta P_{Fe} + \Delta P_{Mech.}) \cdot \left(\frac{f}{f_N} \right)^a \quad \left[\Delta P_j \approx \Delta P_{1\mu}, \quad a \approx 1,4 \text{ až } 1,6 \right] \quad (1.32a,b)$$

2) Ztráty ΔP_M (ztráty závislé na momentu motoru)

$$\Delta P_M = R_c \cdot I_y^2 = k \cdot (\psi \cdot I_y)^2 = k \cdot M^2 \quad (1.33)$$

Dále platí:

$$\frac{\Delta P_M}{\Delta P_{MN}} = \left(\frac{M}{M_N} \right)^2 \quad (1.34)$$

$$\Delta P_{MN} = \Delta P_N - \Delta P_{0N} = \Delta P_N \cdot \left(1 + \frac{\Delta P_{0N}}{\Delta P_N} \right) \quad (1.35)$$

Ztráty v železe ΔP_{Fe}

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{FeN} \cdot \left(\frac{f}{f_N} \right)^a \quad (1.36)$$

Joulové ztráty (ΔP_j) v AM jsou při $\omega < \omega_N$ téměř konstantní, protože v této oblasti je i příslušný proud téměř konstantní.

b) Horní rozsah řízení ($\omega > \omega_N$): V tomto rozsahu řízení je dosaženo ve střídači největší hodnoty napětí, které má stejnou hodnotu i při zvýšené frekvenci napájení. Tímto dochází k částečnému odbuzování (snížení magnetického toku) motoru

Ztráty naprázdno ΔP_0 – při frekvenčním řízení se mění všechny tyto dílčí ztráty:

1) Ztráty Joulové od magnetizačního proudu ($\Delta P_{1\mu}$) budou zmenšeny v důsledku odbuzení

$$\Delta P_{1\mu} = \Delta P_{1\mu N} \cdot \left(\frac{\omega_N}{\omega} \right)^2 = \Delta P_{1\mu N} \cdot \left(\frac{f_N}{f} \right)^2 \quad (1.37)$$

Odhad jednotlivých proporcí ztrát v železe ΔP_{Fe} a ztrát mechanických ΔP_{Mech}

2) Ztráty v železe ΔP_{Fe}

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{FeN} \cdot \left(\frac{\psi}{\psi_N} \right)^2 \cdot \left(\frac{f}{f_N} \right)^a = \Delta P_{FeN} \cdot \sqrt{\frac{f_N}{f}} \quad (1.38)$$

3) Ztráty mechanické ΔP_{Mech}

$$\Delta P_{Mech} = \Delta P_{MechN} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_N} \right)^2 = \Delta P_{MechN} \cdot \left(\frac{f}{f_N} \right)^2 \quad (1.39)$$

$$\Delta P_{Mech} = \Delta P_{MechN} \cdot \left[c_1 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_N} \right) + c_2 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_N} \right)^3 \right] \quad (1.40)$$

Joulové ztráty, které jsou způsobeny příčnou složkou proudu I_y

$$\begin{aligned} \Delta P_M &= \Delta P_{MN} \cdot \left(\frac{I_y}{I_{yN}} \right)^2 = \Delta P_{MN} \cdot \left(\frac{M \cdot \psi_N}{M_N \cdot \psi} \right)^2 \cdot \left(\frac{M \cdot f}{M_N \cdot f_N} \right)^2 = \\ &= \Delta P_{MN} \cdot \left(\frac{M \cdot \omega}{M_N \cdot \omega_N} \right)^2 = \Delta P_{MN} \cdot \left(\frac{P}{P_N} \right)^2 \end{aligned} \quad (1.41)$$

$$\frac{M}{M_N} = \frac{I_y \cdot \psi}{I_{yN} \cdot \psi_N} = \frac{I_y \cdot f_N}{I_{yN} \cdot f} \quad (1.42)$$

Při předpokladu zjednodušení

$$U = U_N = konst. \approx \psi \cdot \omega_S = \omega_N \cdot \omega_{SN} \quad (1.43)$$

platí následující vztah:

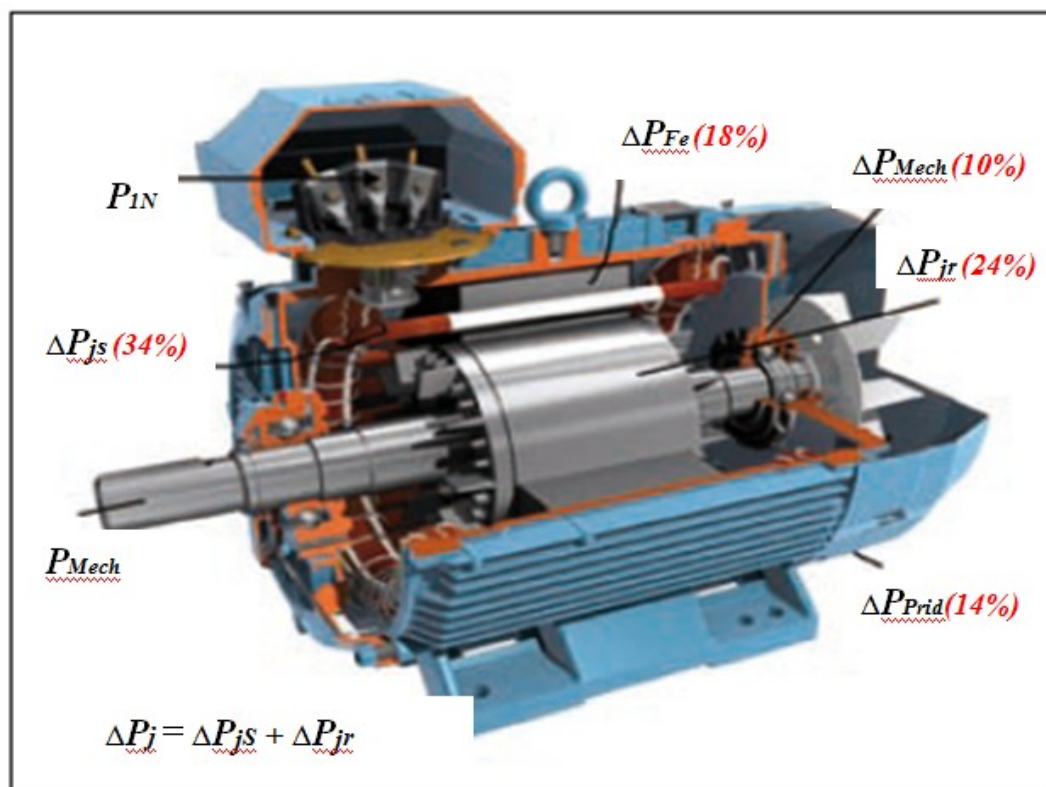
$$\frac{\psi}{\psi_N} = \frac{\omega_{SN}}{\omega_S} = \frac{f_N}{f} \quad (1.44)$$

Rovněž hodnota ω nosného kmitočtu PWM má vliv na velikost ztrát v železe asynchronního motoru.

Joulové ztráty (ΔP_{js}) ve statoru AM se při $\omega > \omega_N$ začínají snižovat, protože začíná klesat i statorový proud motoru. Pokud by v této oblasti došlo k zatěžování AM i nadále např. konstantní jmenovitou hodnotou momentu pracovního mechanismu, docházelo by ke zvyšování Jouleových ztrát ve statoru v závislosti na odpovídajícím proudu motoru. Tím by mohlo dojít k nežádoucímu růstu teploty vinutí a riziko poškození izolace tohoto vinutí. Při snížení zatěžovacího momentu se Joulové ztráty ve statoru snižují dle závislosti na odpovídajícím proudu statoru.

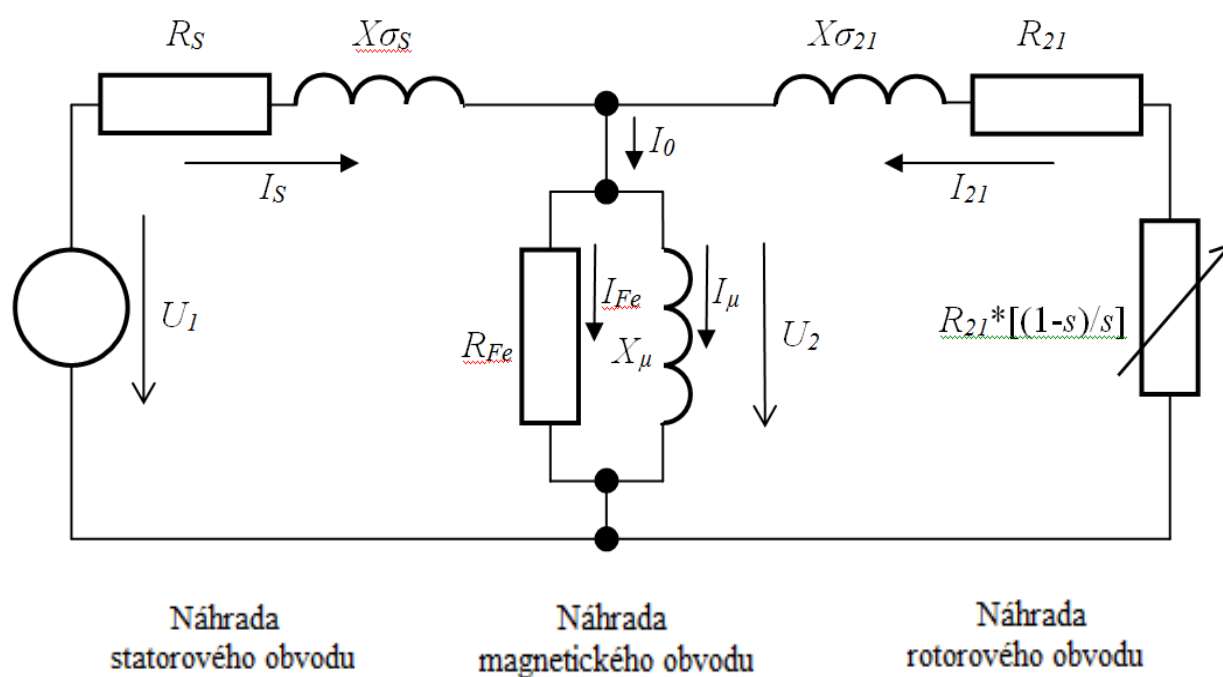
Joulové ztráty (ΔP_{jr}) v rotoru AM zůstávají i při $\omega > \omega_N$ téměř konstantní (rotorový proud se ve své podstatě rovná momentotvorné složce statorového proudu – při předpokladu rovnosti magnetizační a momentotvorné složky proudu). Pokud by v této oblasti došlo k zatěžování AM i nadále např. konstantní jmenovitou hodnotou momentu pracovního mechanismu, docházelo by ke zvyšování Jouleových ztrát v rotoru v závislosti na odpovídajícím proudu motoru.

1.6 Asynchronní motor s rozložením jednotlivých ztrát



Obr. 2 - Asynchronní motor s procentuálním rozložením jednotlivých ztrát (příklad rozložení ztrát převzatý z článku od firmy ABB) [7]

1.7 Úplné náhradní schéma asynchronního motoru



Obr. 3 - Úplné náhradní schéma AM [6]

1.8 Základní sestava a princip činnosti nepřímého měniče kmitočtu s napětovým meziobvodem [1] [2] [5]

Charakteristickým rysem nepřímého měniče kmitočtu s napětovým meziobvodem je stejnosměrný mezilehlý obvod (meziobvod), který propojuje vstupní měnič (klasický usměrňovač, případně pulsní usměrňovač) s výstupním měničem (napětový střídač).

Při použití stejnosměrného mezilehlého obvodu se vstupní střídavé napětí a střídavý proud o vstupní (síťové) frekvenci f_{1MK} vstupním měničem usměrní, pomocí mezilehlého obvodu tvořeného kondenzátorem se vyfiltruje a výstupním měničem se dále rozstřídá na požadovanou výstupní frekvenci f_{2MK} . Existuje zde i možnost oddělené regulace efektivní, příp. okamžité hodnoty výstupního napětí U_{2MK} měniče kmitočtu.

V současné době se nejčastěji používají měniče kmitočtu v takovém uspořádání, kdy je na vstupu měniče neřízený 6-ti pulsní diodový usměrňovač (jedná se o usměrňovač, který se jeví jak konstrukčně, tak i ekonomicky nejvýhodnější). Ve stejnosměrném meziobvodu je kvalitní kondenzátor (zpravidla baterie kondenzátorů) s vysokou hodnotou kapacity. Tento kondenzátor je možno považovat na jedné straně jako zátěž pro vstupní usměrňovač a na straně druhé jako zdroj energie pro výstupní napětový střídač. Spínače jsou pro malé a střední výkony tvořeny nejčastěji tranzistory IGBT, pro velké výkony GTO tyristory.

Řídicí část měniče kmitočtu obsahuje jeden nebo častěji více mikroprocesorů a řeší jednak vlastní řízení měniče a jednak příslušné modulace. Je zpravidla možné měnit základní modulační frekvenci. Někdy lze volit i způsob modulace a také způsob brzdění a regulaci brzdného proudu. Řídicí část měniče v neposlední řadě zajišťuje také některé ochranné a jistící funkce měniče.

Výstupní měnič (střídač napětí) reguluje změnou řídicího úhlu α a dobou vodivosti tyristorů (např. GTO) nebo spínacích tranzistorů (např. IGBT) frekvenci výstupního napětí a proudu. Jestliže má mít při frekvenci do 50 Hz motor stejný moment zvratu, musí se se změnou výstupní frekvence f_{2MK} měnit i výstupní napětí střídače U_{2MK} tak, aby po celou dobu zůstal zachovaný konstantní poměr U_{2MK}/f_{2MK} .

Tímto je udržován konstantní magnetický tok ψ_s satoru a je možno tuto skutečnost a zároveň nutný požadavek pro správný chod měniče kmitočtu řešit dvěma základními způsoby:

1. *Amplitudová modulace* - vstup měniče kmitočtu je realizován pomocí řízeného usměrňovače, který řídí velikost napětí ve stejnosměrném meziobvodu. Střídač napětí je napájený tímto proměnným napětím, jehož velikost se mění podle výstupní frekvence střídače tak, aby byl poměr U_{2mk}/f_{2mk} konstantní.

2. *Šířkové - pulsní modulace (PWM)* - vstup měniče kmitočtu je realizován pomocí neřízeného usměrňovače. Tímto má stejnosměrný meziobvod konstantní napětí U_D . Změna výstupního napětí měniče se provádí přímo ve střídači, a to pomocí pulsně - šířkové modulace. Pro takto modulovaný signál platí, že jeho perioda je konstantní. Doba sepnutí spínacího prvku je tedy přesně určena pravidelným časovým intervalem, který je totožný s periodou nosné frekvence.

Vhodnou volbou šířky impulzů je možné dosáhnout optimální přenos energie do zátěže. Optimálním řízením je také možné dosáhnout toho, že ve výstupním napětí bude nízký obsah vyšších harmonických, případně že některé harmonické budou úplně potlačeny.

Při použití neřízeného vstupního usměrňovače se zařazuje paralelně s kondenzátorem v napětovém meziobvodu tzv. „chopper“, ve kterém se maří energie, která se při brzdění předává z asynchronního motoru přes střídač do tohoto meziobvodu. Jinak by zde mohlo dojít k nežádoucímu nárůstu napětí na kondenzátoru, a tím k možnému poruše měniče kmitočtu.

Měniče kmitočtu mají obecně nepříznivé účinky jak na zátěž, tak na napájecí síť (v souvislosti s vyššími harmonickými složkami). Nejvíce se projevují tyto účinky při použití neřízeného vstupního usměrňovače.

Především z těchto důvodů se v moderních aplikacích častěji používají v měničích kmitočtu vstupní kompatibilní usměrňovače, jejichž obvodové zapojení je shodné se zapojením výstupního střídače napětí.

1.9 Zjednodušující předpoklady pro řešení nepřímého měniče kmitočtu

Podobně jako u asynchronního motoru, tak také při řešení nepřímého měniče kmitočtu (bez uvažování vlivu ztrát i s implementací vybraných druhů ztrát) budou vždy respektovány a uplatněny následující zjednodušující předpoklady:

1. Ideální napájecí síť (nulová impedance napájecí sítě)
2. Nulová tzv. ochranná doba, což je časová prodleva mezi vypnutím jednoho a zapnutím druhého prvku (např. tranzistoru nebo tyristoru) v dané větvi
3. Konstantní napětí ve stejnosměrném meziobvodu nepřímého měniče kmitočtu

1.10 Základní specifikace a popis ztrát nepřímého měniče kmitočtu [3]

V měniči kmitočtu vzniká několik druhů ztrát, a to průchodem proudu jednotlivými větvemi měniče (jak ve vstupním usměrňovači, tak i v napěťovém střídači), přepínací ztráty polovodičových součástek, ztráty v ochranných a řídicích obvodech, ztráty ventilační. Tyto druhy ztrát budou dále obecně popsány. Především se však uplatňují a řeší v provozní praxi ztráty v jednotlivých součástkách při vedení proudu a také ztráty přepínací. U těchto ztrát bude proveden rozbor a následně i implementace do příslušných simulačních modelů.

Pro potřebu řešení přesných výpočtů ztrát při různých provozních stavech motoru by bylo nutno provést řadu náročných měření a jejich odborné vyhodnocení u výrobce.

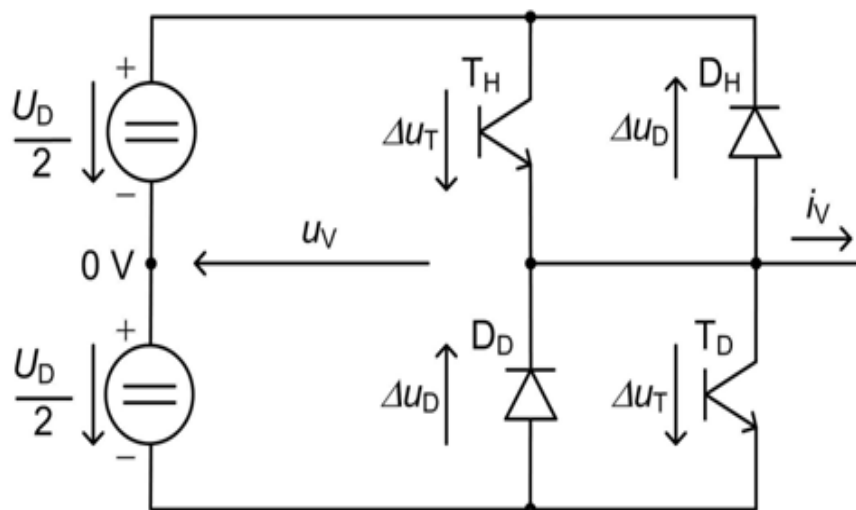
Pro běžné účely a provozní potřeby většinou stačí odborný odhad pro ztráty a výslednou účinnost měniče kmitočtu na základě zjednodušených závislostí ztrát na příslušných parametrech.

a) Ztráty vlivem úbytků napětí na spínacích součástkách (prvcích)

Na níže uvedeném obrázku je zobrazena jedna větev napěťového střídače v rámci kompletního nepřímého měniče kmitočtu (v ostatních větvích střídače je situace stejná) včetně úbytků napětí na polovodičových prvcích (Δu_T , Δu_D), které vznikají průchodem větrového proudu i_V těmito prvky.

V případě, kdy je tento proud kladný (proud protéká z napěťového střídače do asynchronního motoru), vedení daného proudu zajišťuje horní tranzistor T_H a dolní nulová dioda D_D .

Pokud je proud záporný, ve vedení proudu se střídá horní nulová dioda D_H a dolní tranzistor T_D . Velikost a tvar výstupního větrového napětí u_V tedy může být vlivem úbytků napětí na spínacích prvcích zkeslena podle toho, zda je proud kladný nebo záporný, a rovněž podle toho, zda vede tranzistor nebo nulová dioda. Velikost napěťových úbytků na tranzistoru i nulové diodě je závislá jak na velikosti jejich prahových napětí, tak na velikosti procházejícího proudu. Ve většině případů je možno tyto úbytky napětí zanedbat.



Obr. 4 – Schéma jedné větve napěťového střídače s ohledem na úbytky napětí na jednotlivých prvcích

b) Vliv ochranných dob a zapínacích a vypínacích dob tranzistorů na výstupní napětí střídače

Aby nedošlo ke zkratu napětí v napěťovém stejnosměrného meziobvodu při současném sepnutí obou tranzistorů v dané větvi, zavádí se mezi vypnutím jednoho a zapnutím druhého tranzistoru tzv. ochranná doba T_d (dead time). Tato doba sice zabraňuje zkratu v obvodu, ale na druhou stranu způsobuje zkreslení výstupního napětí střídače. Pro běžné pracovní a provozní podmínky je možno vliv těchto ochranných dob zanedbat.

c) Ztráty ve střídači napětí

Ve střídači napětí v rámci měniče kmitočtu vznikají (jak již bylo výše uvedeno) různé druhy ztrát, např. ztráty vedením proudu, přepínací ztráty polovodičových součástek, ztráty způsobené zbytkovým proudem, ztráty v ochranných a řídicích obvodech, ztráty ventilační a další. Hlavní jsou však zde ztráty způsobené odpory jednotlivých tranzistorů a nulových diod při vedení proudu těmito součástkami a ztráty přepínací, které jsou způsobené spínáním a vypínáním příslušných tranzistorů a v menší míře i nulových diod. Tyto hlavní druhy ztrát budou tedy dále rozborovány, budou provedeny i výpočty těchto ztrát a jejich zakomponování do příslušných simulačních modelů.

d) Ztráty ve vstupním neřízeném usměrňovači

Ztráty ve vstupním neřízeném usměrňovači vznikají především při vedení proudu usměrňovacími diodami. Tyto ztráty je možno řešit jednak pomocí příslušných výpočtů nebo podobně jako u ztrát napěťového střídače využít softwarový produkt Semisel Simulation. V této práci budou ztráty ve vstupním neřízeném usměrňovači dále vypočteny pomocí uvedeného software, ale pouze pro představu, v jakých hodnotách se pro dané zvolené parametry tyto ztráty pohybují.

1.11 Teoretický rozbor hlavních druhů ztrát napěťového střídače v rámci měniče kmitočtu [9]

Zde je z hlediska samotného rozboru a následné implementace do příslušných bloků ztrát zaměřena pozornost především na ztráty v napěťovém střídači v rámci MK.

1) Ztráty přepínací jednotlivých součástek (ΔP_{Pr_NS})

$$\Delta P_{Pr_NS} = \frac{1}{\pi} \cdot f_{SP} \cdot K_{I(2)} \cdot E_{T(D)} \quad (1.45)$$

f_{SP} je spínací frekvence v napěťovém střídači

$K_{I(2)}$ je činitel proudového využití příslušného tranzistoru (nulové diody)

$E_{T(D)}$ je celková energie spínací a vypínací příslušného tranzistoru (nulové diody) – dle katalogu

2) Ztráty při vedení proudu jednotlivými součástkami (ΔP_{Ved_NS})

$$\Delta P_{Ved_NS} = U_p \cdot I_{str} + r_d \cdot I_{ef}^2 \quad (1.46)$$

U_p je prahové napětí příslušné součástky – dle katalogu

r_d je dynamický odpor příslušné součástky – dle katalogu

I_{str} je střední hodnota proudu příslušné součástky

I_{ef} je efektivní hodnota proudu příslušné součástky

1.11.1 Jednotlivé ztráty a účinnost měniče kmitočtu v různých provozních stavech [9]

V provozních podmínkách často nepostačuje hodnota účinnosti jednotlivých komponentů pohonu při jmenovitém chodu. Jednak proto, že jmenovitý stav motoru a měniče nebývají od výrobců v souladu, je u nich různá přetížitelnost a při různých provozních stavech motoru se díky možnosti řízení momentu i rychlosti mění také ztráty v jednotlivých komponentech pohonu (tím se mění i účinnost). Pro přesné rozdělení ztrát a účinnosti je zapotřebí znát jednotlivé dílčí ztráty v měniči kmitočtu – podobně jako při základní specifikaci ztrát měniče kmitočtu (řeší se hlavně okamžité ztráty - tedy okamžitý ztrátový výkon).

1) Ztráty vlivem úbytků napětí na polovodičových součástkách (ΔP_{UP})

$$\Delta P_{UP} = \Delta u_p \cdot I_{UP} + k_1 \cdot I_{UP}^2 \quad (1.47)$$

Jsou to ztráty, které jsou dány jednotlivými úbytky napětí na příslušných polovodičových součástkách. Každý zmíněný úbytek napětí má jednak složku úměrnou proudu, a jednak složku konstantní (je zde konstanta úměrnosti k_1).

Pokud jsou známy typové ztráty na polovodičových součástkách ΔP_{UPTyp} při jejich typovém proudu I_{UPTyp} (používá se odhad tohoto proudu) a je předpoklad, že úbytek napětí na těchto součástkách je konstantní, je možno stanovit ztráty vlivem úbytků napětí na polovodičových součástkách takto:

$$\Delta P_{UP} = \frac{I_M}{I_{UPTyp}} \cdot \Delta P_{UPTyp} \quad (1.48)$$

Tento druh ztrát je možno obvykle v rámci ztrát v měniči kmitočtu zanedbat.

2) Ztráty v napěťovém střídači

a) přepínací ztráty na polovodičových součástkách (ΔP_{Pr_NS})

$$\Delta P_{Pr_NS} = \frac{U_D}{U_{DTyp}} \cdot \frac{I_M}{I_{MTyp}} \cdot \frac{f_{Sp}}{f_{SpTyp}} \cdot \Delta P_{PrTyp_NS} \quad (1.49)$$

Tyto ztráty jsou poměrně složité z hlediska poměrně komplikovaných závislostí na napětí součástky, na zapínacím a vypínacím proudu a také na frekvenci spínání ve střídači napětí. Tento druh ztrát je možno rovněž vyjádřit na základě hodnoty spínací frekvence v napěťovém střídači a využitím potřebných parametrů součástky dle příslušného katalogu (viz kapitola 1.11)

b) Ztráty při vedení proudu – tzv. ztráty vedením (ΔP_{Ved_NS})

$$\Delta P_{Ved_NS} = k_2 \cdot I_{UP}^2 \quad \Delta P_{Ved_NS} = k_2 \cdot (I_{str} + I_{ef})^2 \quad (1.50a,b)$$

Tyto ztráty mají lineární závislost na střední hodnotě proudu a kvadratickou závislost na efektivní hodnotě proudu polovodičovou součástkou - doplněnou konstantou úměrnosti označenou k_2 zahrnující potřebné parametry z katalogu výrobce. Tento druh ztrát je možno také vyjádřit na základě vypočtených efektivních a středních hodnot tranzistorů a nulových diod a využitím dalších potřebných parametrů součástky dle příslušného katalogu (viz kapitola 1.11)

Celkové ztráty ve střídači napětí (ΔP_{NS})

$$\Delta P_{NS} = \Delta P_{Pr_NS} + \Delta P_{Ved_NS} \quad (1.51)$$

Při uplatnění zjednodušujících podmínek (podobně jako u ztrát vlivem úbytků napětí na polovodičových součástkách) je možno použít k odhadu celkových ztrát ve střídači napětí tento vztah:

$$\Delta P_{NS} = \frac{I_M}{I_{NSTyp}} \cdot \Delta P_{NSTyp} \quad (1.52)$$

Typové zatížení střídače napětí je možno zjistit u dodavatele, případně odhadnout nebo zvolit. Typový proud střídače napětí je možno určit z dalších dostupných parametrů střídače podle vztahu:

$$I_{NSTyp} = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_N} \quad (1.53)$$

3) Ztráty ve vstupním usměrňovači (ΔP_{US})

Tyto ztráty jsou způsobeny proudem procházejícím usměrňovačem a dá se po zjednodušení předpokládat, že jsou úměrné proudu usměrňovače.

Proud usměrňovače je tvořen proudem I_{US} z napájecí sítě a je současně přímo úměrný proudu I_D stejnosměrného napětíového meziobvodu (doplněno konstantami úměrnosti označené k_D a k_S).

$$\Delta P_{US} = k_D \cdot I_D = k_S \cdot I_{US} \quad (1.54)$$

Pokud jsou známy typové ztráty v usměrňovači ΔP_{USTyp} při jejich typovém proudu I_{DTyp} nebo I_{USTyp} a je předpoklad, že úbytek napětí na součástkách usměrňovače je konstantní, je možno (podobně jako ve střídači napětí) stanovit ztráty v usměrňovači takto:

$$\Delta P_{US} = \frac{I_D}{I_{DTyp}} \cdot \Delta P_{USTyp} = \frac{I_{US}}{I_{USTyp}} \cdot \Delta P_{USTyp} \quad (1.55)$$

4) Ztráty v měniči kmitočtu konstrukční (ΔP_{kon})

Jedná se o ztráty ve ventilátorech, cívkách stykačů, filtrech, řídicích obvodech atd. a tvoří velmi malou část z celkových ztrát v měniči kmitočtu. Je možno je pro praktické výpočty považovat jako konstantní veličinu (možno zvolit na základě odborného odhadu dle provozních zkušeností a měření).

1.11.2 Rozdělení ztrát měniče kmitočtu dle jeho dílčích komponentů [9]

Pro kvalifikovaný odborný odhad ztrát v měniči kmitočtu je zapotřebí znát konkrétní rozložení ztrát pro jeden provozní stav měniče (například pro typový stav měniče kmitočtu) s ohledem na výkon asynchronního motoru, který je tímto měničem kmitočtu řízen.

	Střídač napětí			Usměřňovač	Konstrukce
P_N [kW]	ΔP_{NSPr} [%]	ΔP_{NSVed} [%]	ΔP_{NS} [%]	ΔP_{US} [%]	ΔP_{kon} [%]
6	35	24	59	19	22
20	37	25	62	18	20
60	39	26	65	19	16
100	41	28	69	18	13
200	41	29	70	20	10

Tab. 1 - Rozdělení jednotlivých ztrát v rámci měniče kmitočtu s ohledem na volbu AM

1.11.3 Určení proudu v napět'ovém střídači [9]

Výstupní proudy, které vycházejí ze střídače napětí, jsou tedy vlastně vstupními proudy pro asynchronní motor připojený na výstupu měniče kmitočtu.

Pro určení proudu motoru je možno vyjít z jeho zjednodušeného modelu - jeho momentu M a synchronní rychlosti ω_s případně kmitočtu f .

Proud motoru je možno si v obecné rovině rozložit na podélnou složku proudu I_x způsobující magnetizaci (nabuzení) motoru a příčnou složku proudu I_y vytvářející moment motoru.

Zjednodušené vztahy mezi momentem M , magnetickým tokem Ψ , proudem motoru I_M a synchronní rychlostí ω_s :

$$I_x \approx \psi = \frac{U_N}{\omega_s} = \frac{U_N}{2\pi \cdot f} \quad (1.56)$$

$$M = k \cdot \psi \cdot I_y = k \cdot I_x \cdot I_y \quad (1.57)$$

Dále dle zjednodušeného vektorového diagramu motoru platí pro jednotlivé složky proudu:

$$I_y = I_M \cdot \cos \varphi \quad I_x = I_M \cdot \sin \varphi \quad (1.58a,b)$$

Při jmenovitém chodu motoru platí:

$$I_{yN} = I_{MN} \cdot \cos \varphi_N \quad I_{xN} = I_{MN} \cdot \sin \varphi_N \quad (1.59a,b)$$

Je nutno rozlišit rychlosti pro jednotlivé rozsahy:

- a)** dolní rozsah rychlosti ($\omega \leq \omega_0$): V tomto rozsahu rychlosti je udržován konstantní magnetický tok ($U_N / f = konst.$, $I_x = I_{xN} = konst.$)

$$\frac{I_y}{I_{yN}} = \frac{M}{M_N} \quad (1.60)$$

Proud motoru je možno určit dle vztahu:

$$I_M = \sqrt{I_x^2 + I_y^2} = \sqrt{I_{xN}^2 + \left(I_{yN} \cdot \frac{M}{M_N}\right)^2} \quad (1.61)$$

- b)** horní rozsah rychlosti ($\omega \geq \omega_0$): V tomto rozsahu rychlosti se motor odbuzuje, zmenšuje se magnetický tok a tedy i podélná (magnetizační) složka proudu a pro stejný moment motoru se zvětšuje příčná (momentová) složka proudu ($U_N = konst.$)

Podélná složka proudu:

$$\frac{I_x}{I_{yN}} = \frac{\psi}{\psi_N} = \frac{f_N}{f} \quad (1.62)$$

Příčná složka proudu:

$$\frac{I_y}{I_{yN}} = \frac{M \cdot I_x}{M_N \cdot I_x} = \frac{M \cdot \psi_N}{M_N \cdot \psi} = \frac{M \cdot f}{M_N \cdot f_N} \quad (1.63)$$

Proud motoru je možno určit dle vztahu:

$$I_M = \sqrt{\left(I_{xN} \cdot \frac{f_N}{f}\right)^2 + \left(I_{yN} \cdot \frac{M \cdot f}{M_N \cdot f_N}\right)^2} \quad (1.64)$$

1.12 Vstupní neřízený usměrňovač a stejnosměrný napěťový meziobvod [10]

Pro nepřímý měnič kmitočtu s napěťovým meziobvodem byl v daném případě použit na vstupu 6-ti pulsní neřízený usměrňovač. Tímto je na kondenzátoru v napěťovém meziobvodu konstantní napětí U_D a provoz měniče kmitočtu bez možnosti rekuperace energie zpět do napájecí sítě.

Pro výstupní napětí 3-fázového 6-ti pulsního usměrňovače platí:

$$U_{D-1} = \frac{3 \cdot U_f \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{2}}{\pi} \quad (1.65)$$

Vzhledem k tomu, že na základě provedené typové zkoušky vybraného asynchronního motoru jsou k dispozici jednotlivé parametry při napájení motoru z 3 - fázové sítě o hodnotě sdruženého napětí 1000 V a je žádoucí mít při sestavování a simulaci pohonu srovnatelné podmínky, je zapotřebí napětí v meziobvodu U_{D-1} přizpůsobit těmto podmínkám dle následujícího rozboru.

Pro sinusovou modulaci PWM platí, že nejvyšší hodnota amplitudy 1. harmonické sdruženého výstupního napětí z měniče kmitočtu (výstupní hodnota ze střídače napětí pro napájení asynchronního motoru) je 0,866 hodnoty napětí v meziobvodu. Zavádí se tzv. modulační činitel M_C , který vyjadřuje velikost amplitudy 1. harmonické sdruženého výstupního napětí $U_{AB(1)-1}$ vzhledem k napětí meziobvodu U_{D-1} (z 6-ti pulsního usměrňovače) příp. výstupní napětí $U_{AB(1)}$ vzhledem k upravenému napětí meziobvodu U_D (další rozbor bude řešen pro toto upravené napětí meziobvodu).

Pro základní sinusovou modulaci PWM je tedy hodnota M_C nejvýše 0,866.

Pokud by bylo nutno zvýšit hodnotu amplitudy 1. harmonické výstupního sdruženého napětí, je jedním ze způsobů připočítání 3. harmonické k základnímu sinusovému nf napětí v poměru 1 ku 6. V tomto případě je možno dosáhnout hodnotu modulačního činitele $M_C = 1$ (tato možnost v dalším rozboru uplatněna nebude).

Vztah pro základní sinusovou modulaci

$$M_C = \frac{U_{AB(1)}}{U_D} = 0,866 \quad (1.66)$$

Určení efektivní hodnoty a amplitudy 1. harmonické sdruženého výstupního napětí je možno řešit buď výpočtem na základě zhodnocení a vyjádření sledu pulsů o proměnné střídě výstupního napětí ze střídače napětí nebo experimentálním odhadem. Výstupní napětí ze střídače napětí je optimálně unipolární.

Amplituda 1. harmonické sdruženého výstupního napětí

$$U_{AB(1)} = U_D \cdot M_C \quad (1.67)$$

Efektivní hodnota 1. harmonické sdruženého výstupního napětí

$$U_{ABef(1)} = U_D \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot M_C = 0,7071 \cdot U_D \cdot M_C \quad (1.68)$$

Celková efektivní hodnota sdruženého výstupního napětí (platí pro všechny harmonické)

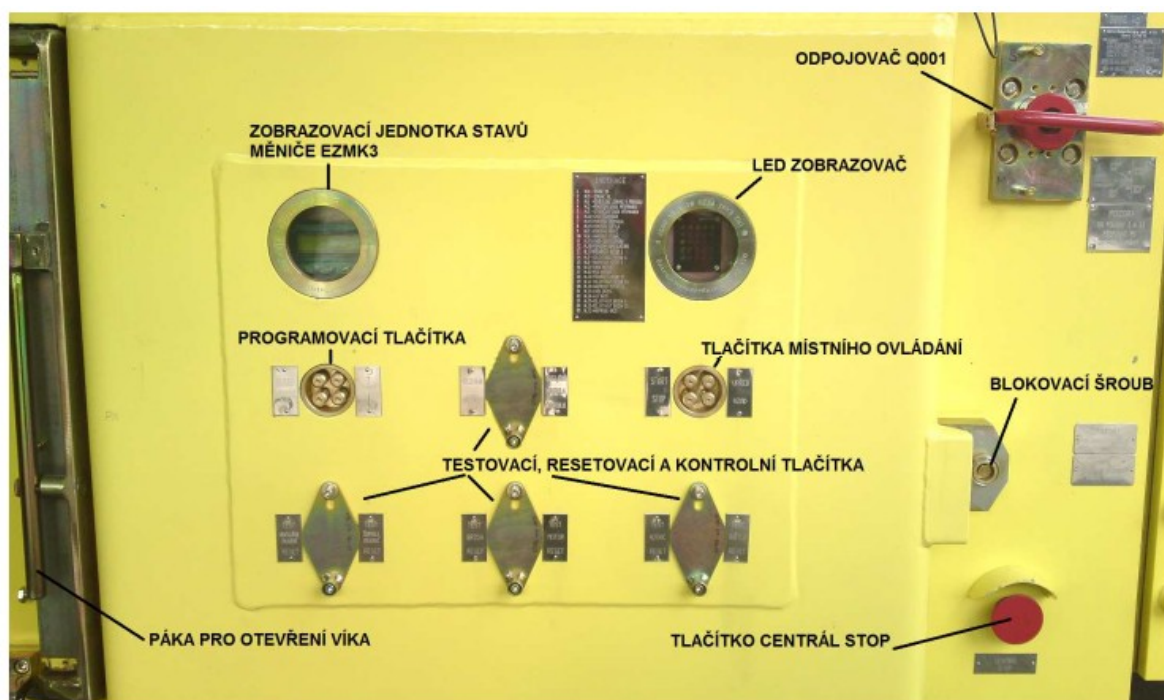
$$U_{ABef} = U_D \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot M_C = 0,7979 \cdot U_D \cdot M_C \quad (1.69)$$

Upravená hodnota napětí ve stejnosměrném napěťovém meziobvodu

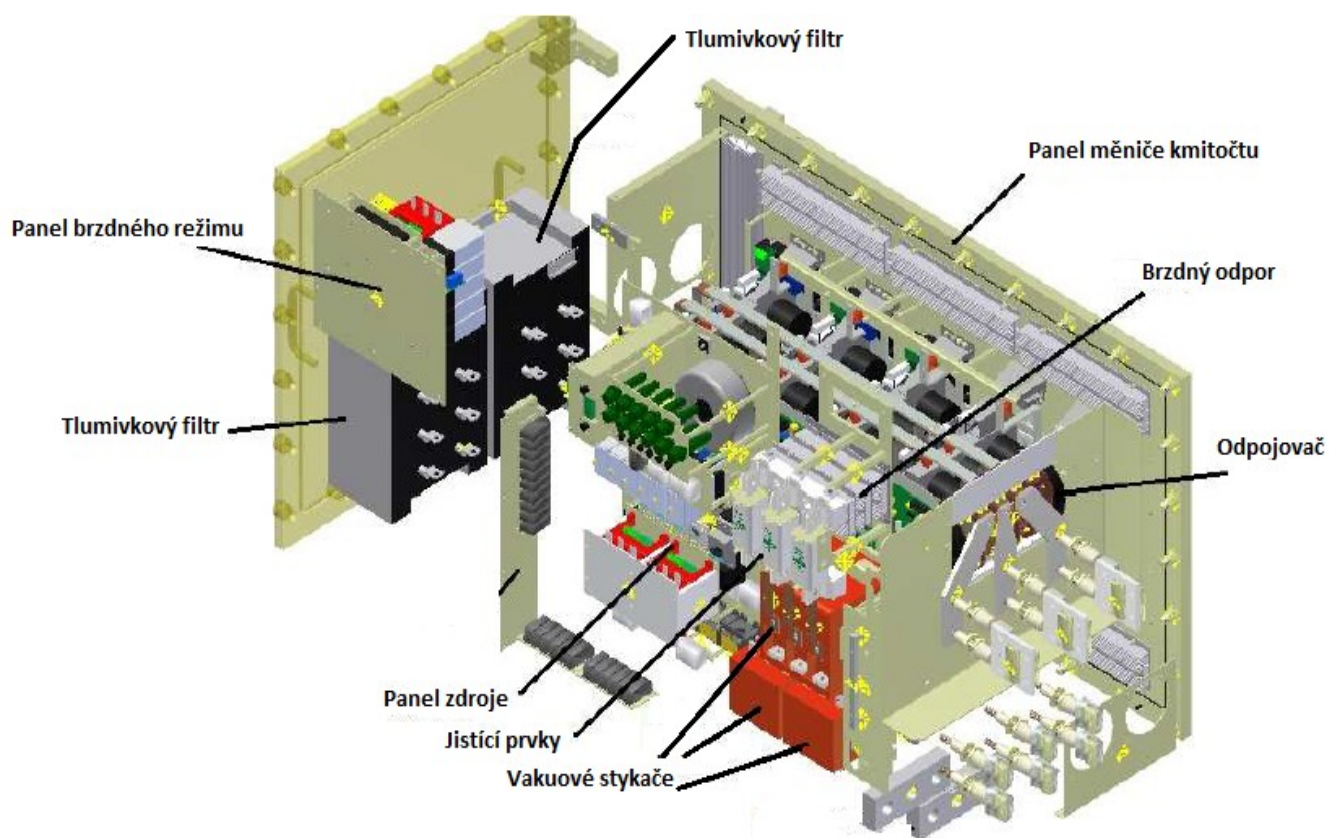
$$U_D = \frac{U_{ABef(1)}}{0,7071 \cdot M_C} \quad (U_{ABef(1)} = U_f \cdot \sqrt{3} = U_N) \quad (1.70)$$

(hodnota U_D vypočtená dle tohoto vztahu bude používána pro další řešení příslušné problematiky)

1.13 Nepřímý měnič kmitočtu v nevýbušném provedení s popisem jeho základních částí [8]

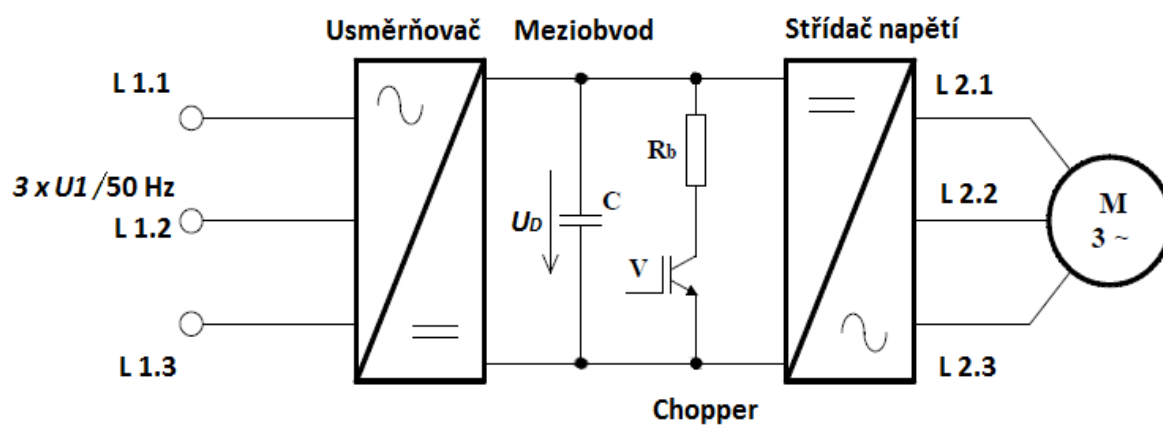


Obr. 5 – Nepřímý měnič kmitočtu v nevýbušném provedení

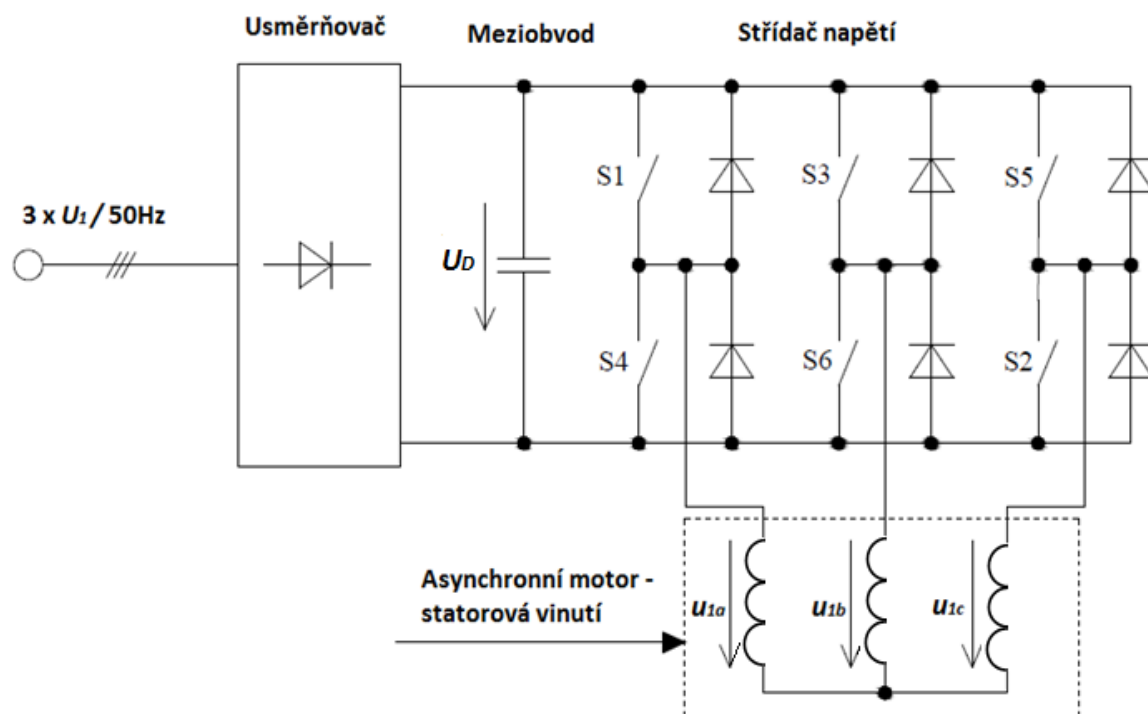


Obr. 6 – Nepřímý měnič kmitočtu s popisem základních částí

1.14 Základní zapojení nepřímého měniče kmitočtu s napětovým meziobvodem [5]



Obr. 7 – Zapojení nepřímého měniče kmitočtu – zapojení základních bloků



Obr. 8 – Nepřímý měnič kmitočtu s vnitřním zapojením napětového střídače

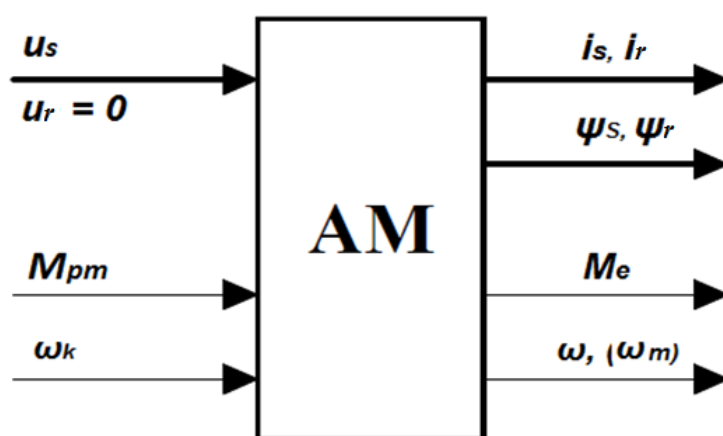
2 Sestavení matematického a simulačního modelu jednotlivých částí pohonu bez uvažování ztrát a doplnění hlavních částí pohonu o příslušné simulační bloky ztrát

2.1 Matematický model asynchronního motoru bez uvažování ztrát [2] [13]

Matematický model asynchronního motoru tvoří ve všech případech poměrně složitý systém nelineárních diferenciálních rovnic.

Aby mohlo být dosaženo dostatečně přesné prezentace matematického modelu daného motoru, je nutno přijmout a respektovat výše uvedené zjednodušující předpoklady (v první etapě modelování motoru nebudou rovněž uvažovány ztráty daného motoru).

Při řešení a modelování motoru se zpravidla uvažují jako vstupní veličiny napětí a moment pracovního mechanismu (včetně volby souřadnicového systému). Jako výstupní veličiny se uvažují proudy, magnetické toky, elektromagnetický moment a elektrická (příp. mechanická) úhlová rychlost motoru.



Obr. 9 – Základní vstupní a výstupní veličiny asynchronního motoru

Asynchronní motor je po stránce konstrukční tvořen dvěma trojfázovými systémy vinutí vázanými vzájemnou magnetickou vazbou. Tato vzájemná indukčnost vinutí statoru a rotoru se mění s časem prostřednictvím otáčení rotoru vůči statoru.

Existuje celkem šest základních rovnic pro jednotlivé fáze asynchronního motoru (jednotlivá vinutí statoru s označením $k = a, b, c$ a vinutí rotoru s označením $k = A, B, C$):

$$u_a = R_1 \cdot i_a + \frac{d\psi_a}{dt} \quad u_A = R_2 \cdot i_A + \frac{d\psi_A}{dt} \quad (2.1a,b)$$

$$u_b = R_1 \cdot i_b + \frac{d\psi_b}{dt} \quad u_B = R_2 \cdot i_B + \frac{d\psi_B}{dt} \quad (2.2a,b)$$

$$u_c = R_1 \cdot i_c + \frac{d\psi_c}{dt} \quad u_C = R_2 \cdot i_C + \frac{d\psi_C}{dt} \quad (2.3a,b)$$

Obecná napěťová rovnice trojfázového asynchronního motoru

$$u_k = R_k \cdot I_k + \frac{d\psi_k}{dt} \quad (2.4)$$

R_k je odpor pro jednotlivá vinutí

I_k je proud pro jednotlivá vinutí

Ψ_k je spřažený magnetický tok jednotlivých vinutí

Vztah pro výsledný spřažený magnetický tok jedné fáze statorového vinutí stojícího asynchronního motoru:

$$\psi_a = L_a \cdot i_a + M_s \cdot i_b \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + M_s \cdot i_c \cdot \cos\left(-\frac{2\pi}{3}\right) + M_{sr} \cdot i_A + M_{sr} \cdot i_B \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + M_{sr} \cdot i_C \cdot \cos\left(-\frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.5)$$

L_a je vlastní indukčnost jedné fáze statorového vinutí

M_s je vzájemná indukčnost mezi dvěma fázemi statorového vinutí

M_{sr} je vzájemná indukčnost mezi fázemi statorového a rotorového vinutí

Vzájemná indukčnost vinutí mezi fázemi statoru a rotoru se tedy mění s časem prostřednictvím otáčení rotoru vůči statoru (viz výše).

V závislosti na natočení rotoru vůči statoru se rovněž mění spřažený magnetický tok.

Vztah pro úhel natočení rotoru:

$$\theta = \int \omega_m \cdot dt \quad (2.6)$$

ω_m je mechanická úhlová rychlost motoru

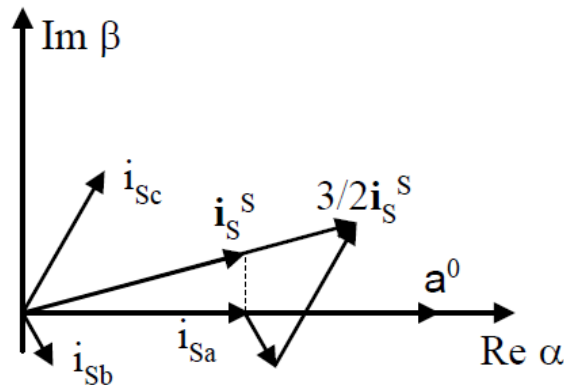
Upravený vztah pro výsledný spřažený magnetický tok jedné fáze statorového vinutí stojícího

asynchronního motoru s tím, že platí: $\left(\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) = -\frac{1}{2}\right)$

$$\psi_a = L_a \cdot i_a - \frac{M_s \cdot i_b}{2} - \frac{M_s \cdot i_c}{2} + M_{sr} \cdot i_A \cdot \cos(\theta) + M_{sr} \cdot i_B \cdot \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + M_{sr} \cdot i_C \cdot \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.7)$$

Pro zjednodušení řešení AM a snížení počtu diferenciálních rovnic popisujících daný motor se nabízí možnost transformace trojfázové soustavy na ekvivalentní dvoufázovou soustavu zavedením tzv. komplexních prostorových vektorů. Komplexní prostorové vektory určují svou polohou prostorovou polohu maxim sledovaných veličin.

Použitím prostorového vektoru, který je definovaný v komplexní rovině, je možno vypočítat okamžité hodnoty jednotlivých veličin trojfázového systému.



Obr. 10 – Definice prostorového vektoru

Prostorový vektor statorového proudu (v systému α, β)

$$\vec{i}_s = \frac{2}{3} \cdot \left(i_{sa} + a^{-1} \cdot i_{sb} + a^{-2} \cdot i_{sc} \right) \quad (2.8)$$

$$a = e^{j2\pi/3}$$

i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} jsou okamžité hodnoty proudů statoru jednotlivých fází

Výsledný vztah pro prostorový vektor

$$\bar{i}_S^S = \frac{3}{2} \cdot I_{S\max} \cdot \frac{2}{3} \cdot e^{j\omega t} = I_{S\max} \cdot e^{j\omega t} \quad (2.9)$$

ω je úhlová rychlost

$I_{S\max}$ je amplituda satorového proudu

Absolutní hodnota prostorového vektoru je poté rovna amplitudě skutečného satorového proudu.

Pro zjednodušení samotného modelu asynchronního motoru je nutno odstranit závislost změny magnetické vazby satorového a rotorového vinutí při otáčení rotoru.

Zde je možno využít Clarkovu a případně Parkovou transformaci. Cílem těchto transformací je identifikovat a následně zpracovat jednotlivé děje, které probíhají ve satoru a rotoru ze společného souřadnicového systému, který svírá úhel θ (při úhlové rychlosti ω) s osou satorového vinutí. Tímto vznikne pevná magnetická vazba a probíhající děje ve satoru i rotoru se pak budou promítat do ekvivalentního dvoufázového souřadnicového systému.

Clarkova transformace

Tato transformace umožňuje přechod do stacionárních satorových souřadnic ($\alpha \beta$). Spočívá stejně jako ostatní obdobné transformace souřadnic v přepočtu 3-fázového systému do 2-fázového systému souřadnic. Výsledkem je možnost vyjádření rotujícího fázoru (komplexoru) v komplexní rovině pouze pomocí dvou souřadnic a snížení počtu diferenciálních rovnic.

Níže na **Obr. 11** jsou znázorněny souřadnice 3-fázového systému ($a \ b \ c$) a přepočtené souřadnice ($\alpha \ \beta$), které jsou na sebe kolmé a jsou pevně svázané se statorem. Pokud je předpoklad, že $\omega_K = 0$ a osa α je ztotožněna s osou a , potom platí následující vztah pro satorový proud:

$$\bar{i}_{s\alpha\beta} = \frac{2}{3} \cdot \left(i_{sa} + \bar{a}^{-1} \cdot i_{sb} + \bar{a}^{-2} \cdot i_{sc} \right) \quad (2.10a)$$

Po dosazení vztahů pro jednotkové vektory (místo $\bar{a}^{-1}, \bar{a}^{-2}$):

$$\bar{i}_{s\alpha\beta} = i_{sa} + j \cdot i_{s\beta} = \frac{2}{3} \cdot \left(i_{sa} - \frac{1}{2} i_{sb} - \frac{1}{2} i_{sc} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} i_{sb} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} i_{sc} \right) \quad (2.10b)$$

Pro skutečnost, že stroj (motor) je symetrický a není připojen nulový vodič, platí:

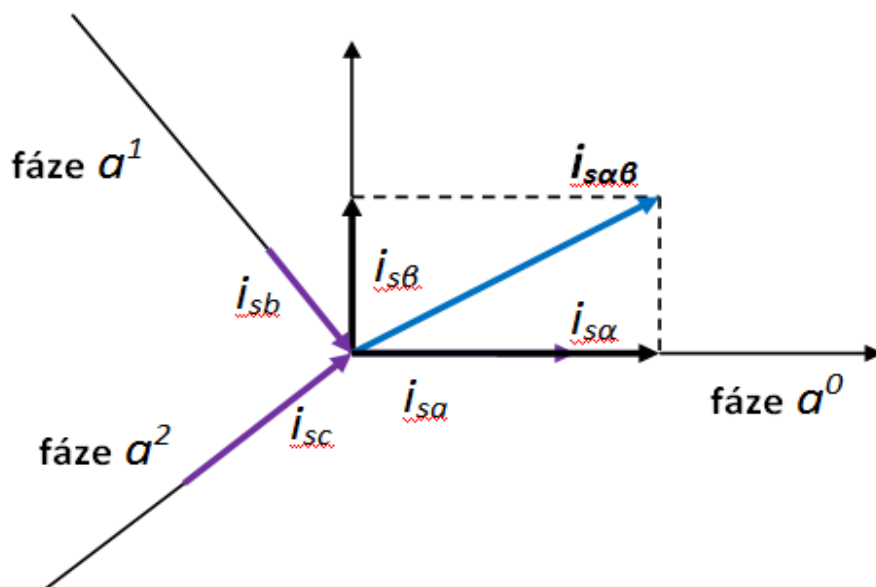
$$i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0 \quad (2.11)$$

$$u_{sa} + u_{sb} + u_{sc} = 0 \quad (2.12)$$

Potom pro jednotlivé složky proudu v souřadnicovém systému ($\alpha \ \beta$) platí:

$$i_{sa} = \operatorname{Re}\{\bar{i}_{s\alpha\beta}\} = \frac{2}{3} \cdot \left(i_{sa} - \frac{1}{2} i_{sb} - \frac{1}{2} i_{sc} \right) = i_{sa} \quad (2.13)$$

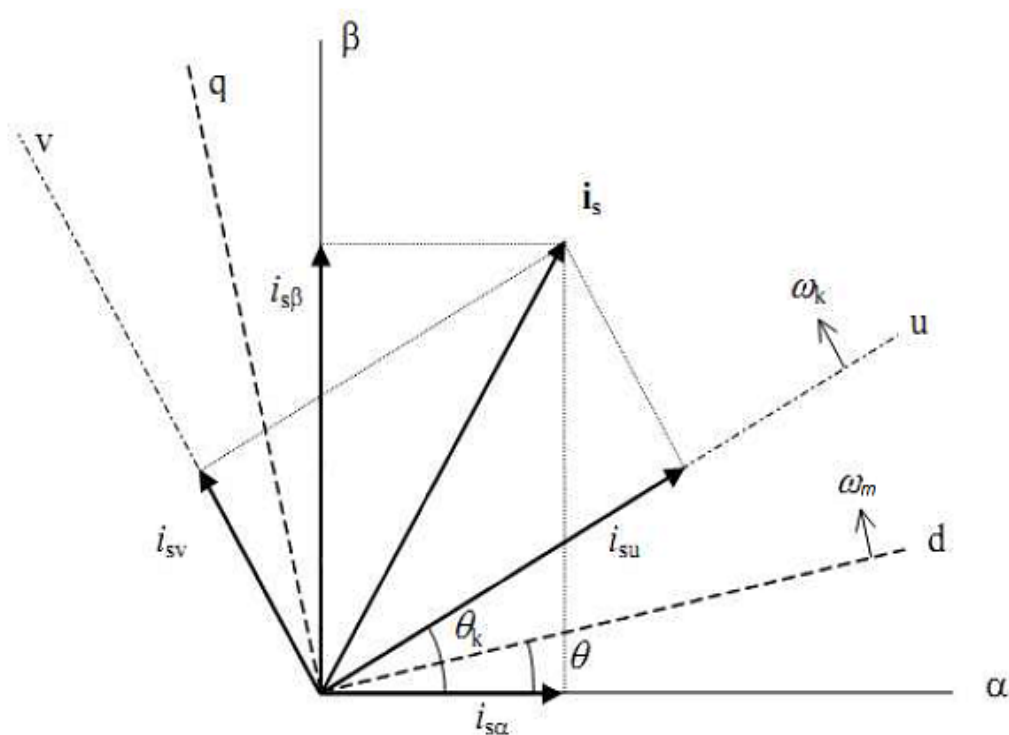
$$i_{s\beta} = \operatorname{Im}\{\bar{i}_{s\alpha\beta}\} = \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{2} i_{sb} - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{sc} \right) = \frac{(i_{sb} - i_{sc})}{\sqrt{3}} \quad (2.14)$$



Obr. 11 – Zobrazení transformace do 2-fázového systému ($\alpha \beta$) pomocí prostorového vektoru

Existuje a v praxi je používáno několik typů souřadnicových systémů:

- systém s orientací na stator (osy α a β , úhlová rychlost $\omega = 0$)
- systém s orientací na rotor (osy d a q , úhlová rychlost ω_m)
- obecný souřadnicový systém - systém rotující obecnou úhlovou rychlostí (osy u a v , úhlová rychlost ω_k)



Obr. 12 – Zobrazení prostorového vektoru proudu v různých souřadnicových systémech

2.1.1 Matematický model motoru v obecném souřadnicovém systému [11]

(pozn. Všechny indexy zde platí pro tento obecný souřadnicový systém. Obdobně je tato platnost i pro ostatní souřadnicové systémy).

Napěťové rovnice asynchronního motoru v obecném souřadnicovém systému pro stator

$$u_{su} = R_s \cdot i_{su} + \frac{d\psi_{su}}{dt} - \omega_k \cdot \psi_{sv} \quad (2.15)$$

$$u_{sv} = R_s \cdot i_{sv} + \frac{d\psi_{sv}}{dt} - \omega_k \cdot \psi_{su} \quad (2.16)$$

R_s je odpor vinutí statoru

Ψ_s je magnetický tok statoru

ω_k je všeobecná úhlová rychlost

Napěťové rovnice asynchronního motoru v obecném souřadnicovém systému pro rotor (platí pro motor s kotvou nakrátko)

$$u_{ru} = R_r \cdot i_{ru} + \frac{d\psi_{ru}}{dt} - (\omega_k - \omega) \cdot \psi_{rv} = 0 \quad (2.17)$$

$$u_{rv} = R_r \cdot i_{rv} + \frac{d\psi_{rv}}{dt} - (\omega_k - \omega) \cdot \psi_{ru} = 0 \quad (2.18)$$

R_r je odpor vinutí rotoru

Ψ_r je magnetický tok rotoru

ω je úhlová rychlost

ω_k je všeobecná úhlová rychlost

Jednotlivé složky magnetického toku statoru a rotoru:

$$\psi_{su} = L_s \cdot i_{su} + L_h \cdot i_{ru} \quad (2.19)$$

$$\psi_{sv} = L_s \cdot i_{sv} + L_h \cdot i_{rv} \quad (2.20)$$

$$\left(L_s = L_h \cdot (1 + \sigma_s) = L_h + L_{\sigma s}, \quad \sigma_s = \frac{L_{\sigma s}}{L_h} = \frac{L_s}{L_h} - 1 \right) \quad (2.21a,b)$$

$$\psi_{ru} = L_r \cdot i_{ru} + L_h \cdot i_{su} \quad (2.22)$$

$$\psi_{rv} = L_r \cdot i_{rv} + L_h \cdot i_{sv} \quad (2.23)$$

$$\left(L_r = L_h \cdot (1 + \sigma_r) = L_h + L_{\sigma r}, \quad \sigma_r = \frac{L_{\sigma r}}{L_h} = \frac{L_r}{L_h} - 1 \right) \quad (2.24a,b)$$

Celkový činitel rozptylu:

$$\sigma = 1 - \frac{L_h^2}{L_s \cdot L_r} = 1 - \frac{1}{(1 + \sigma_s) \cdot (1 + \sigma_r)} \quad (2.25)$$

L_h je vzájemná indukčnost při úhlu $\theta = 0$

L_s je celková indukčnost statoru

L_r je celková indukčnost rotoru

σ_s je činitel rozptylu statoru

σ_r je činitel rozptylu rotoru

$L_{\sigma s}$ je rozptylová indukčnost statoru

$L_{\sigma r}$ je rozptylová indukčnost rotoru

Výsledný vztah pro elektromagnetický moment motoru:

$$M_e = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot (i_{sv} \cdot \psi_{ru} - i_{su} \cdot \psi_{rv}) \quad (2.26)$$

Pohybová rovnice:

$$M_e - M_{pm} = J \cdot \frac{d\omega_m}{dt}, \quad \omega_m = \frac{\omega}{p_p} \quad (2.27)$$

M_{pm} je moment pracovního mechanismu

J je moment setrvačnosti

ω je elektrická úhlová rychlost motoru

ω_m je mechanická úhlová rychlost motoru

p_p je počet polpárů motoru

Na základě odvozených rovnic je možno dle stavových proměnných sestavit několik typů modelů asynchronního motoru, které jsou si navzájem ekvivalentní.

- Tokový model asynchronního motoru (zde jsou jako stavové proměnné magnetické toky rotoru a statoru).
- Proudový model asynchronního motoru (zde jsou jako stavové proměnné proudy rotoru a statoru).
- Proudově – tokový model asynchronního motoru (zde jsou jako stavové proměnné jak magnetické toky, tak proudy motoru).

2.1.2 Tokový model asynchronního motoru [11]

Pro potřeby řešení matematického a následně simulačního modelu asynchronního motoru se v rámci zadání jeví jako nejvýhodnější tokový model motoru. Tento model je zároveň z hlediska řešení diferenciálních rovnic i nejjednodušší. Dále je tedy řešen tokový model motoru na základě odvození výše uvedených vztahů (2.19 až 2.25).

Vyjádření jednotlivých proudů statoru a rotoru:

$$\begin{bmatrix} i_{su} \\ i_{ru} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma \cdot L_s} & \frac{-L_h}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \\ \frac{-L_h}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} & \frac{1}{\sigma \cdot L_r} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \psi_{su} \\ \psi_{ru} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$\begin{bmatrix} i_{sv} \\ i_{rv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma \cdot L_s} & \frac{-L_h}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \\ \frac{-L_h}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} & \frac{1}{\sigma \cdot L_r} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \psi_{sv} \\ \psi_{rv} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$$i_{su} = \frac{1}{\sigma \cdot L_s} \cdot \psi_{su} - \frac{L_h}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \cdot \psi_{ru} \quad (2.30)$$

$$i_{sv} = \frac{1}{\sigma \cdot L_s} \cdot \psi_{sv} - \frac{L_h}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \cdot \psi_{rv} \quad (2.31)$$

$$i_{ru} = \frac{1}{\sigma \cdot L_r} \cdot \psi_{ru} - \frac{L_h}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \cdot \psi_{su} \quad (2.32)$$

$$i_{rv} = \frac{1}{\sigma \cdot L_r} \cdot \psi_{rv} - \frac{L_h}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \cdot \psi_{sv} \quad (2.33)$$

Pokud se takto vyjádřené jednotlivé proudy dosadí do výše uvedených napětových rovnic pro stator a rotor asynchronního motoru, tak se jeho stavovými proměnnými stávají jednotlivé magnetické toky a úhlová rychlost.

Po Laplaceově transformaci a úpravě do stavového tvaru (prvky matic budou funkcí úhlové rychlosti ω) platí:

$$p \cdot \psi = A \cdot \psi + B \cdot U, \quad i = C \cdot \psi, \quad M_e = f(\psi) \quad (2.34a,b,c)$$

Rozepsaná stavová rovnice:

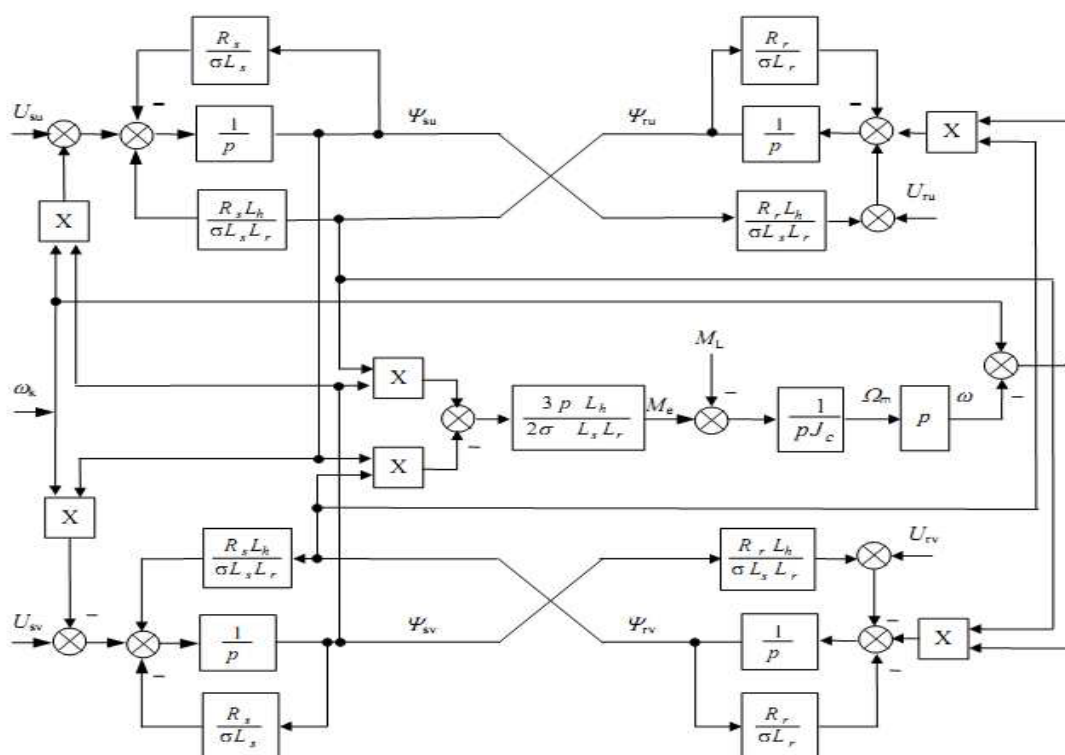
$$p \cdot \begin{bmatrix} \psi_{su} \\ \psi_{sv} \\ \psi_{ru} \\ \psi_{rv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{\sigma \cdot L_s} & \omega_k & \frac{R_s \cdot L_h}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} & 0 \\ -\omega_k & \frac{-R_s}{\sigma \cdot L_s} & 0 & \frac{R_s L_h}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \\ \frac{R_s \cdot L_h}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} & 0 & \frac{-R_r}{\sigma \cdot L_r} & \omega_k - \omega \\ 0 & \frac{R_r \cdot L_h}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} & -(\omega_k - \omega) & \frac{-R_r}{\sigma \cdot L_r} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \psi_{su} \\ \psi_{sv} \\ \psi_{ru} \\ \psi_{rv} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{su} \\ U_{sv} \\ U_{ru} \\ U_{rv} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Vztah pro elektromagnetický moment motoru:

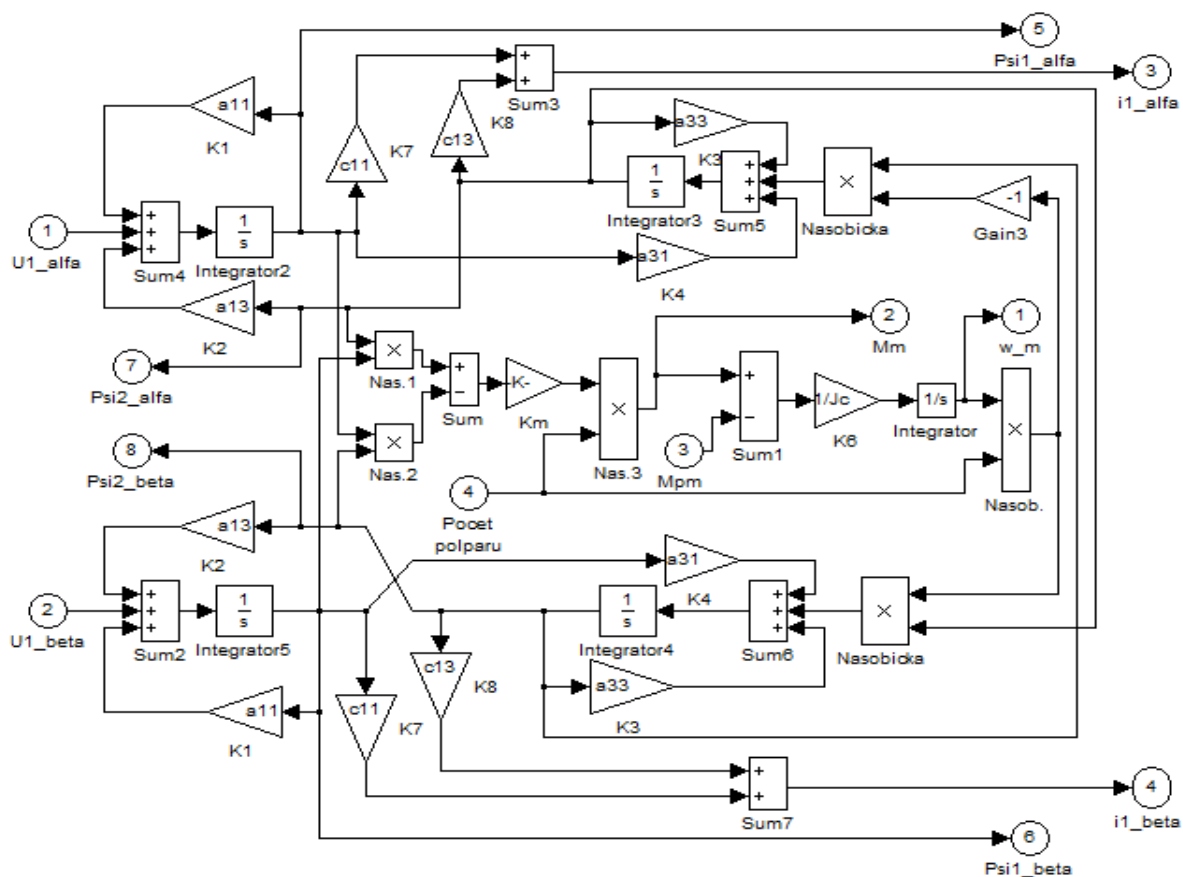
$$M_e = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot (\psi_{sv} \cdot \psi_{ru} - \psi_{su} \cdot \psi_{rv}) \quad (2.36)$$

Pohybová rovnice:

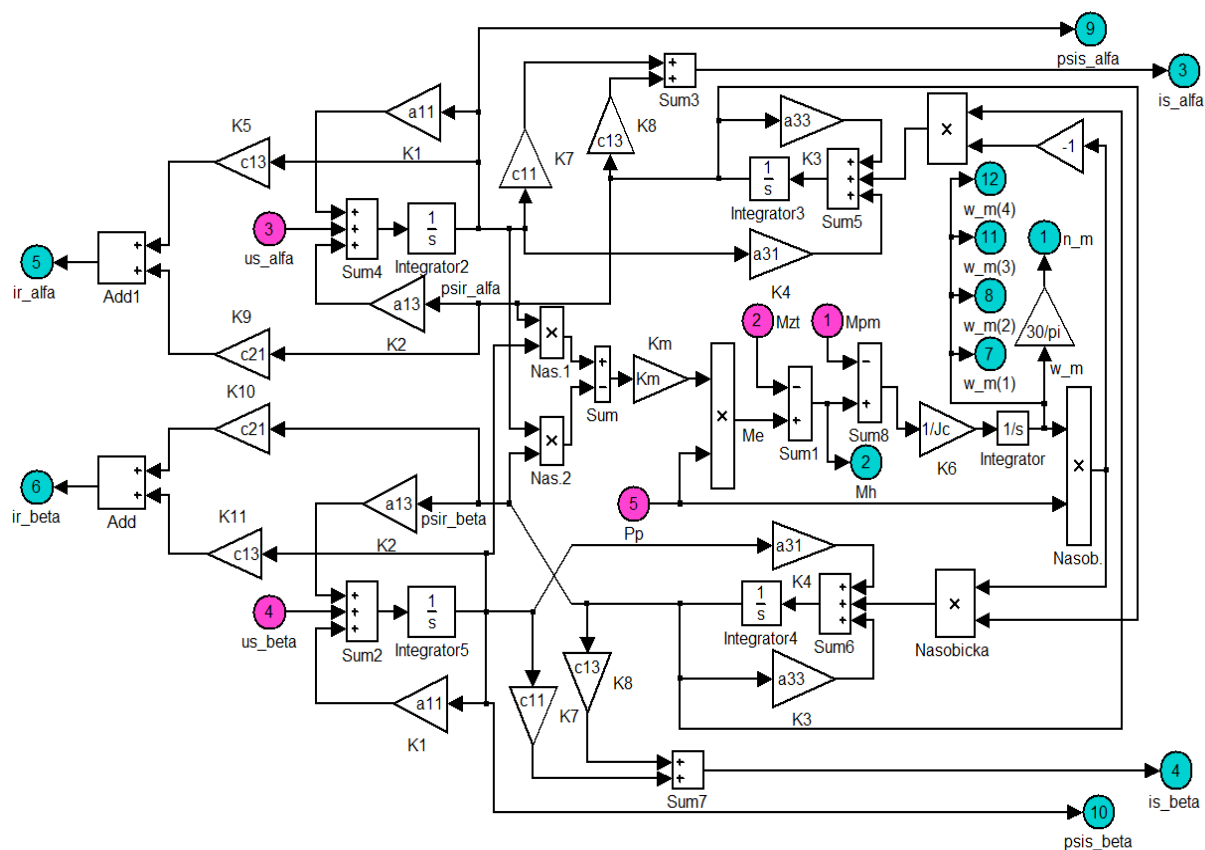
$$M_e - M_{pm} = J \cdot p \cdot \omega_m, \quad \omega_m = \frac{\omega}{p_p} \quad (2.37)$$



Obr. 13 – Obecný tokový model asynchronního motoru v Simulinku



Obr. 14 – Předložený tokový model asynchronního motoru v systému $(\alpha \beta)$ [11]

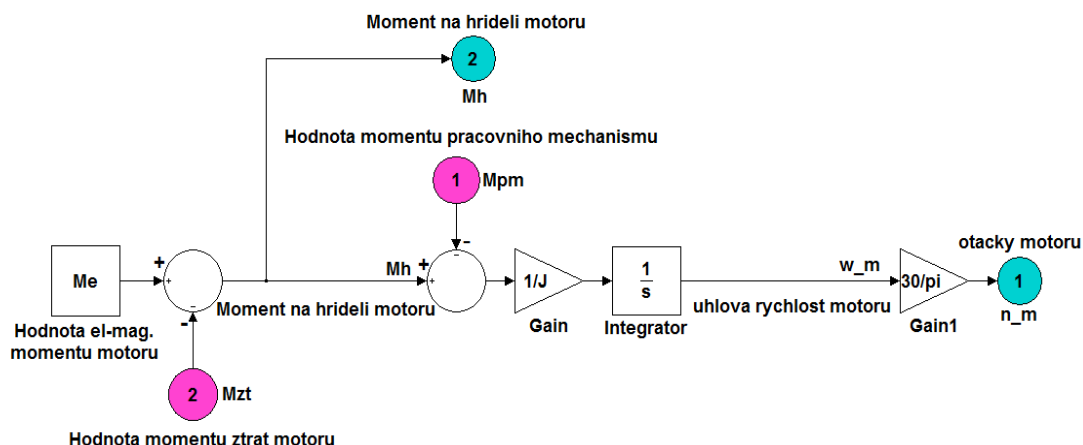


Obr. 15 – Modifikovaný tokový model asynchronního motoru v systému $(\alpha \beta)$, doplněný o složky proudu rotoru a s úpravou bloku pohybové rovnice

Úprava pohybové rovnice:

Úprava spočívá v zavedení momentu ztrát (M_{zt}) z jednotlivých bloků ztrát a momentů ztrát asynchronního motoru (kapitola 2.4.1) do tokového modelu motoru. Tento moment ztrát je poté odečten od elektromagnetického momentu motoru (M_e) a výsledkem je odpovídající moment na hřídeli motoru (M_h).

Tento moment na hřídeli motoru vyjadřuje poměry tokového modelu motoru s uvažováním ztrát. (moment ztrát vycházející z Jouleových ztrát motoru (příloha č. 6) se zde neuplatňuje, poněvadž vlastní Jouleovy ztráty jsou již součástí modelu motoru).



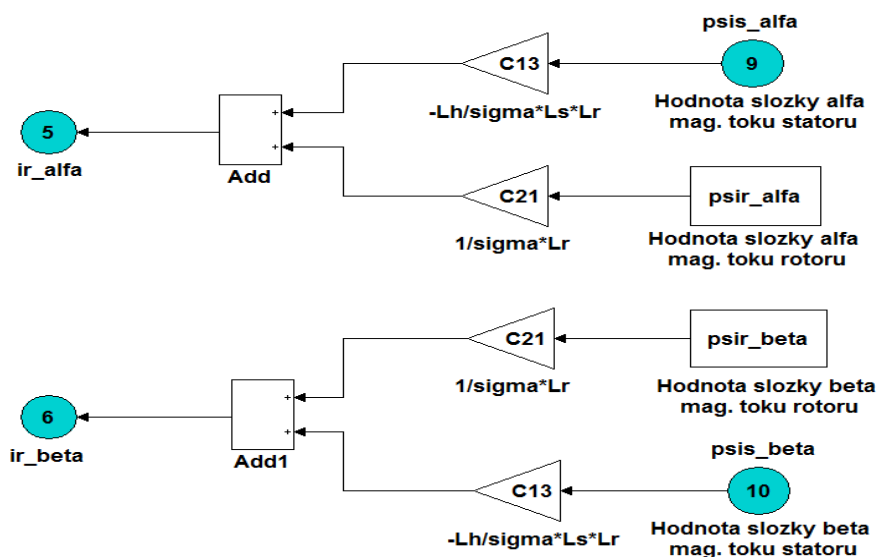
Obr. 16 – Úprava bloku pohybové rovnice

Doplnění složek proudu rotoru:

Doplnění spočívá v implementaci základních vztahů týkající se matematického modelu asynchronního motoru do předloženého tokového modelu motoru.

$$i_{r\alpha} = \left(\psi_{s\alpha} \cdot \left(\frac{-L_h}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \right) \right) + \left(\psi_{r\alpha} \cdot \frac{1}{\sigma \cdot L_r} \right) = \psi_{r\alpha} \cdot \frac{1}{\sigma \cdot L_r} - \psi_{s\alpha} \cdot \frac{L_h}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \quad (2.38)$$

$$i_{r\beta} = \left(\psi_{s\beta} \cdot \left(\frac{-L_h}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \right) \right) + \left(\psi_{r\beta} \cdot \frac{1}{\sigma \cdot L_r} \right) = \psi_{r\beta} \cdot \frac{1}{\sigma \cdot L_r} - \psi_{s\beta} \cdot \frac{L_h}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \quad (2.39)$$



Obr. 17 – Doplnění a začlenění jednotlivých složek proudu rotoru

2.2 Řešení modelu asynchronního motoru , u kterého je od výrobce k dispozici protokol o typové zkoušce motoru a štítkové hodnoty motoru

2.2.1 Parametry asynchronního motoru

Typ asynchronního motoru: **HVM 280M-4**

Název parametru	Označení	Jednotka	Hodnota
Základní parametry			
(Měření při zatížení)			
Jmenovitý činný výkon motoru	P_N	[kW]	100
Jmenovité statorové napětí motoru	U_N	[V]	1000
Jmenovité otáčky motoru	n_N	[ot/min]	1484
Jmenovitý účinník motoru	$\cos\varphi_N$	[-]	0,917
Jmenovitá účinnost motoru	η_N	[%]	92,6
Jmenovitý proud motoru	I_N	[A]	68
Jmenovitá frekvence motoru	f_N	[Hz]	50
Počet pólových dvojic	p_p	[-]	2
Jmenovitý moment motoru	M_N	[Nm]	644
Poměr max. moment/jmenovitý moment (tzv. momentová přetížitelnost q_m)	M_{Max}/M_N	[-]	3,2
Poměr záběrný moment/jmenovitý moment	M_{Zab}/M_N	[-]	2,2
Poměr záběrný proud/jmenovitý proud	I_{Zab}/I_N	[-]	5,4
Jmenovitý skluz	s_N	[%]	1,067
Moment setrvačnosti motoru	J	[kgm ²]	5,07
Měření naprázdno			
Napětí motoru naprázdno	U_0	[V]	1000
Proud motoru naprázdno	I_0	[A]	16,5
Ztráty motoru naprázdno	ΔP_0	[W]	4340
Otáčky motoru naprázdno	n_0	[ot/min]	1499
Měření nakrátko			
Napětí motoru nakrátko	U_K	[V]	184
Proud motoru nakrátko	I_K	[A]	68
Ztráty motoru nakrátko	ΔP_K	[W]	9380
Otáčky motoru nakrátko	n_K	[ot/min]	0
Měření při jmenovitém zatížení			
Ztráty motoru jmenovité	ΔP_N	[W]	8004
Měření ostatní			
Odpor jedné fáze statoru	R_S	[Ω]	0,153

Tab. 2 - Parametry vybraného asynchronního motoru předložené výrobcem (dle přílohy č. 14)

2.2.2 Výpočet parametrů motoru z jeho štítkových hodnot a na základě výsledků typové zkoušky motoru

Jmenovitý skluz motoru

$$s_N = \frac{n_s - n_N}{n_s} \quad (2.40)$$

$$s_N = \frac{1500 - 1484}{1500} = \underline{\underline{0,01067}}$$

$$s_N = \underline{\underline{1,067 \%}}$$

(jmenovitý skluz motoru odpovídá výsledkům typové zkoušky)

Skluz zvratu ze štítkových hodnot (pro konstantní kmitočet)

$$s_{zvN} = s_{zv} = s_N \cdot \left(q_m + \sqrt{q_m^2 - 1} \right) \quad (2.41)$$

$$s_{zv} = 0,01067 \cdot \left(3,2 + \sqrt{(3,2)^2 - 1} \right) = \underline{\underline{0,0666}}$$

Proud motoru naprázdno

$$I_0 = I_{1N} \cdot \left(\sin \varphi_1 - \left(\cos \varphi_1 \cdot \frac{s_N}{s_{zv}} \right) \right) \quad (2.42)$$

$$I_0 = 68 \cdot \left(0,392 - \left(0,92 \cdot \frac{0,01067}{0,0666} \right) \right) = \underline{\underline{16,6 \text{ A}}}$$

(proud motoru naprázdno odpovídá výsledkům typové zkoušky)

Výpočet rozptylové indukčnosti statoru $L_{\sigma s}$ a rotoru $L_{\sigma r}$ (z hodnot měření nakrátko motoru)

$$Z_K = \frac{U_{Kf}}{I_K} \quad \left(U_{Kf} = \frac{U_K}{\sqrt{3}} \right) \quad (2.43)$$

$$Z_K = \frac{184 / \sqrt{3}}{68} = 1,57 \Omega$$

$$\cos \varphi_K = \frac{\Delta P_K}{\sqrt{3} \cdot U_K \cdot I_K} \quad (2.44)$$

$$\cos \varphi_K = \frac{9380}{\sqrt{3} \cdot 184 \cdot 68} = 0,43$$

$$\sin \varphi_K = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_K} \quad (2.45)$$

$$\sin \varphi_K = \sqrt{1 - 0,43^2} = 0,91$$

$$X_K = Z_K \cdot \sin \varphi_K \quad (2.46)$$

$$X_K = 1,57 \cdot 0,91 = 1,43 \Omega$$

Při zvolení rovnosti rozptylových reaktancí statoru a rotoru platí

$$X_{\sigma s} = X_{\sigma r} = \frac{X_K}{2} \quad (2.47)$$

$$X_{\sigma s} = X_{\sigma r} = \frac{1,43}{2} = 0,715 \, \Omega$$

$$L_{\sigma s} = L_{\sigma r} = \frac{X_K/2}{\omega} = \frac{X_K/2}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (2.48)$$

$$L_{\sigma s} = L_{\sigma r} = \frac{0,715}{314,16} = \underline{\underline{0,0022 \, H}}$$

Výpočet magnetizační indukčnosti L_μ (z hodnot měření naprázdno)

1. způsob výpočtu magnetizační indukčnosti L_μ

$$X_\mu = \frac{U_{0f}}{I_\mu} \quad \left(U_{0f} = \frac{U_N}{\sqrt{3}} \right) \quad (2.49a,b)$$

$$I_\mu = I_0 \cdot \sin \varphi_0 \quad (2.50)$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{\Delta P_0}{\sqrt{3} \cdot U_0 \cdot I_0} \quad (zde U_0 = U_N) \quad (2.51a,b)$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{4330}{\sqrt{3} \cdot 1000 \cdot 16,5} = 0,152$$

$$\sin \varphi_0 = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_0} \quad (2.52)$$

$$\sin \varphi_0 = \sqrt{1 - 0,152^2} = 0,988$$

$$I_\mu = 16,5 \cdot 0,988 = 16,3 \, A$$

$$X_\mu = \frac{1000/\sqrt{3}}{16,3} = 35,4 \, \Omega$$

$$L_\mu = \frac{X_\mu}{\omega} \quad (2.53)$$

$$L_\mu = \frac{35,4}{314,16} = \underline{\underline{0,113 \, H}}$$

2. způsob výpočtu magnetizační indukčnosti L_μ

$$X_\mu = \frac{U_{0f}}{I_0 \cdot \sin \varphi_0} \quad (2.54)$$

$$X_\mu = \frac{1000/\sqrt{3}}{16,5 \cdot 0,988} = 35,4 \, \Omega$$

$$L_\mu = \frac{X_\mu}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (2.55)$$

$$L_\mu = \frac{35,4}{314,16} = \underline{\underline{0,113 \, H}}$$

Odpor vinutí rotoru přepočtený na stator

Při zvolení rovnosti odporu vinutí rotoru a přepočteného odporu na stator platí:

$$R_s = R_{21} = \underline{\underline{0,153 \, \Omega}} \quad (2.56)$$

2.3 Specifikace základních parametrů pro varianty momentů pracovního mechanismu a výstupní frekvence z řídicího bloku pro asynchronní motor a měnič kmitočtu

U sestaveného pohonu s AM napájeným z MK bude provedena simulace pro 3 zvolené hodnoty momentů pracovního mechanismu a 2 hodnoty řídicího napětí se zvolenou frekvencí pro frekvenční měnič a asynchronní motor. Tím je umožněno sledování chování daného pohonu v různých nastavených režimech z hlediska výkonových poměrů a možnost vzájemného posouzení a porovnání výsledných údajů.

Jako průběhy momentů pracovního mechanismu (zatěžovací momenty) byly pro AM zvoleny celkem 3 hodnoty **Mpm** k označení jednotlivých variant (obr. 19)

- a) varianta označená **Mpm-0**: hodnota momentu pracovního mechanismu je nulová (tj. 0 Nm) (nezatížený pohon, chod motoru naprázdno) a doba simulace $T_{sim} = 3 \, s$
- b) varianta označená **Mpm-322**: hodnota momentu pracovního mechanismu je hodnota 50 % jmenovitého zatěžovacího momentu (tj. 322 Nm) a doba simulace $T_{sim} = 3 \, s$
- c) varianta označená **Mpm-644**: hodnota momentu pracovního mechanismu je hodnota 100 % jmenovitého zatěžovacího momentu (tj. 644 Nm) a doba simulace $T_{sim} = 3 \, s$

Jako průběhy výstupní frekvence pro MK a AM byly zvoleny celkem 2 hodnoty řídicího napětí se zvolenou frekvencí k označení jednotlivých variant (obr. 20)

- a) varianta označená **f-25**: hodnota výstupní frekvence z řídicího bloku je hodnota 50 % jmenovité napájecí frekvence (tj. $f = 25 \, \text{Hz}$ pro $U_r = 5 \, \text{V}$) a doba simulace $T_{sim} = 3 \, s$
- b) varianta označená **f-50**: hodnota výstupní frekvence z řídicího bloku je hodnota 100 % jmenovité napájecí frekvence (tj. $f = 50 \, \text{Hz}$ pro $U_r = 10 \, \text{V}$) a doba simulace $T_{sim} = 3 \, s$

2.4. Simulační bloky hlavních ztrát asynchronního motoru

1) Blok ztrát reprezentující Jouleovy ztráty ve statoru a rotoru AM včetně odpovídajícího momentu ztrát

Blok a jeho vnitřní zapojení je součástí příloh (příloha č. 5 a č. 6). Vstupem jsou okamžité hodnoty jednotlivých složek proudů statoru a rotoru doplněné o mechanické otáčky motoru. Výstupem bloku je výsledná celková hodnota Jouleových ztrát v motoru a odpovídající moment ztrát. Blok Jouleových ztrát AM byl vytvořen na základě základních vztahů pro tepelné ztráty ve statoru (1.10) a v rotoru (vztah 1.11). Moment ztrát byl řešen dle příslušného vztahu (1.7).

2) Blok ztrát reprezentující ztráty v železe AM včetně odpovídajícího momentu ztrát

Blok a jeho vnitřní zapojení je součástí příloh (příloha č. 5 a č. 7). Vstupem jsou okamžité hodnoty jednotlivých složek magnetického toku statoru (ztráty v železe rotoru se zanedbávají) doplněné o mechanické otáčky motoru. Výstupem bloku je výsledná hodnota ztrát v železe statoru a odpovídající moment ztrát. Blok ztrát v železe byl vytvořen na základě základního vztahu pro tyto ztráty (1.13). Moment ztrát byl řešen dle příslušného vztahu (1.7).

3) Blok ztrát reprezentující mechanické ztráty AM včetně odpovídajícího momentu ztrát

Blok a jeho vnitřní zapojení je součástí příloh (příloha č. 5 a č. 8). Vstupem jsou mechanické otáčky motoru. Výstupem bloku je výsledná hodnota mechanických ztrát v AM a odpovídající moment ztrát. Blok mechanických ztrát AM byl vytvořen na základě základního vztahu pro tyto ztráty (1.18). Moment ztrát byl řešen dle příslušného vztahu (1.7).

4) Blok ztrát reprezentující přídavné ztráty AM včetně odpovídajícího momentu ztrát

Blok a jeho vnitřní zapojení je součástí příloh (příloha č. 5 a č. 9). Vstupem jsou mechanické otáčky motoru. Výstupem bloku je výsledná hodnota přídavných ztrát v AM a odpovídající moment ztrát. Blok přídavných ztrát AM byl vytvořen na základě přibližného vztahu pro tyto ztráty (1.19) a volbou zvolené konstantní hodnoty těchto ztrát. Moment ztrát byl řešen dle příslušného vztahu (1.7).

2.5 Simulační model bloku řídicího napětí

Tento blok pro generování řídicích napětí (vnitřní zapojení je v příloze č. 4) pro vstup do měniče kmitočtu byl vytvořen v Simulinku dle základních vztahů pro fázově posunutá napětí o 120° . Základem bloku je vstupní zvolená hodnota pro zadávání úhlové rychlosti s odpovídající frekvencí. Dále je aplikována funkce „sin“ a jednotlivé fázové posuny. Spolu s blokem „Divide“ a „Constant“ s vloženou zvolenou hodnotou je zajištěn konstantní poměr mezi frekvencí a amplitudou řídicího napětí (tedy konstantní magnetický tok). Výstupem bloku jsou 3 řídicí napětí fázově posunutá o 120° se zvolenou frekvencí a odpovídající amplitudou.

2.6 Matematický model nepřímého měniče kmitočtu bez uvažování ztrát [2] [11]

Pro napájení asynchronních motorů je vhodné a někdy i žádoucí použít u moderních pohonů nepřímý měnič kmitočtu s napěťovým meziobvodem v klasickém zapojení.

Matematický model měniče kmitočtu je podobně jako asynchronní motor poměrně složitý systém. Aby mohlo být dosaženo prezentace matematického modelu daného měniče kmitočtu s dostatečnou přesností, je nutno přijmout a respektovat výše uvedené zjednodušující předpoklad (rovněž nebudou v první etapě modelování měniče kmitočtu uvažovány jeho jednotlivé ztráty).

U nepřímých měničů kmitočtu se pro řízení efektivní hodnoty výstupního napětí používají dva základní způsoby pulsně-šířkové modulace (PWM):

- 1) Komparační PWM – princip modulace spočívá v realizaci komparace trojúhelníkového nebo pilového napětí s jednotlivými složkami řídicího sinusového napětí.

2) Vektorová PWM – princip modulace spočívá v realizaci vypočtené polohy a velikosti prostorového vektoru statorového napětí.

Vstupní zadávací veličinou pro vybranou komparační PWM mohou být přímo hodnoty generovaných sinusových napájecích napětí v jednotlivých fázích. Stanovení výstupního napětí v matematickém modelu měniče vychází z okamžitých průběhů napětí při spínání jednotlivých spínacích prvků. To je dáno porovnáváním tří referenčních napětí nazývaných jako řídicích napětí u_{ra} , u_{rb} a u_{rc} s trojúhelníkovým (příp. pilovitým) napětím u_p , které je přivedeno z příslušného generátoru. V daném případě bude používán generátor trojúhelníkového napětí s výstupním napětím $\pm u_p$ (označovaný i zde jako napětí pily).

Pokud bude řídicí napětí pro danou fázi v daném okamžiku větší než napětí pily, sepne horní spínač (např. IGBT tranzistor) příslušné větve napětového střídače, pokud bude řídicí napětí menší než napětí pily, sepne dolní spínač příslušné větve napětového střídače.

Na výstupu z měniče kmitočtu se tak vytvoří pulsní průběh napětí (např. na svorkách motoru, který je k měniči kmitočtu připojený jako zátěž).

Algoritmus spínání v napětovém střídači v rámci měniče kmitočtu:

$$\text{Jestliže } u_{ra} \geq u_p, \text{ potom } u_{a0} = \frac{U_D}{2} \quad \text{Jestliže } u_{ra} \leq u_p, \text{ potom } u_{a0} = -\frac{U_D}{2}$$

$$\text{Jestliže } u_{rb} \geq u_p, \text{ potom } u_{b0} = \frac{U_D}{2} \quad \text{Jestliže } u_{rb} \leq u_p, \text{ potom } u_{b0} = -\frac{U_D}{2}$$

$$\text{Jestliže } u_{rc} \geq u_p, \text{ potom } u_{c0} = \frac{U_D}{2} \quad \text{Jestliže } u_{rc} \leq u_p, \text{ potom } u_{c0} = -\frac{U_D}{2}$$

u_{a0} , u_{b0} , u_{c0} jsou pomocná napětí (napětí mezi příslušnou svorkou ve střídači napětí a středem napětí v napětovém meziobvodu U_D)

Okamžité hodnoty fázových napětí:

$$u_a = \frac{2 \cdot u_{a0} - u_{b0} - u_{c0}}{3} \quad (2.57)$$

$$u_b = \frac{2 \cdot u_{b0} - u_{c0} - u_{a0}}{3} \quad (2.58)$$

$$u_c = \frac{2 \cdot u_{c0} - u_{a0} - u_{b0}}{3} \quad (2.59)$$

Vztahy pro napětí u_α a u_β :

$$u_\alpha = u_a = \frac{2 \cdot u_{a0} - u_{b0} - u_{c0}}{3} \quad (2.60)$$

$$u_\beta = \frac{u_b - u_c}{\sqrt{3}} = \left(\frac{2 \cdot u_{b0} - u_{c0} - u_{a0}}{3} - \frac{2 \cdot u_{c0} - u_{a0} - u_{b0}}{3} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{3 \cdot u_{b0} - 3 \cdot u_{c0}}{3} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{u_{b0} - u_{c0}}{\sqrt{3}}$$

$$u_\beta = \frac{u_{b0} - u_{c0}}{\sqrt{3}} \quad (2.61)$$

Na základě sekvence spínání tranzistorů v napětovém střídači a pomocných vztahů (2.57 až 2.61) byl zpracován odpovídající soubor m-file s algoritmem pro model napětového střídače (příloha č. 2). Model napětového střídače je parametrizován pomocí masky, kde je zadávána hodnota spínací frekvence (f_{sp}), fázového napětí (U_f) a napětí pily (U_p). Následně byl zpracován simulační model měniče kmitočtu (příloha č. 3). Na vstup měniče kmitočtu je přivedeno napětí meziobvodu (U_D), napětí pily (U_p) a tři fázově posunutá řídicí napětí (u_{ra} , u_{rb} a u_{rc}). Výstupní napětí je pomocí Clarkovy transformace 3/2 převedeno na výstupní napětí u_α a u_β (vstupní napětí pro asynchronní motor).

2.7 Dimenzování měniče kmitočtu pro jeho jmenovité parametry

Protože nebyl k dispozici konkrétní měnič kmitočtu s jeho typovými příp. s dalšími potřebnými parametry, bylo přistoupeno ke zvolení typového výkonu daného měniče kmitočtu pro vybraný asynchronní motor a nad rámec zadání rovněž k základnímu návrhu měniče kmitočtu se zaměřením na napěťový střídač (dimenzování a následné výpočty pro výběr vhodných součástek, a to na základě potřebných vztahů a také s pomocí software Simusel Simulation firmy Semikron).

Tento nepřímý měnič kmitočtu o zvoleném typovém výkonu 150 kW bude sloužit pro napájení a řízení vybraného třífázového asynchronního motoru o jmenovitém výkonu 100 kW. Koncepce měniče bude klasická tzn. třífázová střídavá napájecí síť, neřízený 6-ti pulsní usměrňovač, stejnosměrný napěťový meziobvod, střídač napětí pracující v režimu komparační pulsně-šířkové modulace (PWM).

2.7.1 Dimenzování součástek měniče kmitočtu

Dimenzování předmětného měniče spočívá ve výběru takových tranzistorů a nulových diod, aby nebyly při kterémkoliv režimu měniče překročeny jmenovité hodnoty udávané výrobcem. Dimenzování tranzistorů (pro daný případ byly použity tranzistory IGBT) spočívá ve zvolení takové řady tranzistorů, aby nebyl překročen jejich maximální dovolený proud a maximální závěrné napětí. Tranzistory musí být dimenzovány i výkonově. Výhodou měniče kmitočtu je skutečnost, že všech šest bloků napěťového střídače (tranzistory ve spolupráci s nulovými diodami) má identické provozní podmínky, a proto je možno řešit a vypočítat pouze jeden z těchto bloků a ostatní pak budou stejné.

Parametry pohonu s asynchronním motorem napájeným z nepřímého měniče kmitočtu

Napájecí síť:

U_{I_3ef} 3 x 1000 V efektivní hodnota trojfázového napájecího sdruženého napětí

Parametry pro měnič kmitočtu:

$U_{IN_1} (U_{D_1})$	1350 V	níže vypočtená hodnota napětí v napěťovém meziobvodu
$U_{IN} (U_D)$	1632 V	níže vypočtená upravená hodnota napětí v napěťovém meziobvodu
$U_{ABef(1)} (U_N)$	1000 V	efektivní hodnota 1. harmonické sdruženého napětí mezi zvolenými větvemi A – B
$U_{Aef(1)} (U_\vartheta)$	577 V	efektivní hodnota 1. harmonické fázového napětí
$I_{Aef(1)}$	94,2 A	níže vypočtená efektivní hodnota 1. harmonické fázového proudu ve zvolené větvi A
f_{2MK}	50 Hz	výstupní frekvence střídavého napětí měniče kmitočtu
$\cos\varphi$	0,92	hodnota jmenovitého účinníku asynchronního motoru (zátěže měniče kmitočtu)
P_{MK}	150 kW	nejvyšší hodnota výkonu na zátěži měniče kmitočtu - v daném případě zvolený typový výkon měniče kmitočtu
f_{sp}	2 kHz	spínací frekvence součástek napěťového střídače v rámci měniče

Napěťové a proudové dimenzování tranzistorů IGBT a nulových diod [12]

Je nutno nejprve provést výpočet základních potřebných parametrů:

Vztah pro výkon na zátěži měniče kmitočtu

$$P_{MK} = \sqrt{3} \cdot U_{ABef(1)} \cdot I_{Aef(1)} \cdot \cos \varphi_N \quad (2.62)$$

Efektivní hodnota 1. harmonické fázového proudu ve zvolené fázi A ($I_{Aef(1)}$) (pro $P_{MK} = 150 \text{ kW}$)

$$I_{Aef(1)} = \frac{P_{MK}}{\sqrt{3} \cdot U_{ABef(1)} \cdot \cos \varphi_N} \quad (2.63)$$

$$I_{Aef(1)} = \frac{150 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 1000 \cdot 0,92} = 94,2 \text{ A}$$

Amplituda 1. harmonické fázového proudu ve zvolené fázi A ($I_{A(1)}$)

$$I_{A(1)} = I_{Aef(1)} \cdot \sqrt{2} \quad (2.64)$$

$$I_{A(1)} = 94,2 \cdot \sqrt{2} = 134 \text{ A}$$

Amplituda 1. harmonické fázového proudu je hodnota maximálního proudu, na kterou musí být dimenzovány vybrané tranzistory a nulové diody napětového střídače

$$I_{A(1)} = I_{T_max} = I_{D_max} = \underline{\underline{134 \text{ A}}} \quad (2.65)$$

Stejnoseměrné napětí napětového meziobvodu - pro 6-ti pulsní vstupní neřízený usměrňovač (U_{D_1})

$$U_{D_1} = \frac{3 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{3}}{\pi} \cdot U_{Aef(1)} \quad (2.66)$$

$$U_{D_1} = 2,34 \cdot 577 = 1350 \text{ V}$$

Amplituda 1. harmonické sdruženého napětí je hodnota maximálního napětí střídače v trojfázovém systému - zde pro trojfázový střídač mezi zvolenými fázemi A - B ($U_{AB(1)_1}$)

$$U_{AB(1)_1} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot U_{D_1} = 0,866 \cdot U_{D_1} \quad (2.67)$$

$$U_{AB(1)_1} = 0,866 \cdot 1350 = \underline{\underline{1169 \text{ V}}}$$

Upravené stejnosměrné napětí napětového meziobvodu (U_D)

$$U_D = \frac{U_{ABef(1)}}{0,7071 \cdot M_C} \quad (2.68)$$

$$U_D = \frac{1000}{0,7071 \cdot 0,866} = 1632 \text{ V}$$

Amplituda 1. harmonické sdruženého napětí střídače mezi zvolenými fázemi A - B pro upravené napětí meziobvodu ($U_{AB(1)}$)

$$U_{AB(1)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot U_D \quad (2.69)$$

$$U_{AB(1)} = 0,866 \cdot 1632 = \underline{\underline{1414 \text{ V}}}$$

Efektivní hodnota proudu tranzistoru (I_{T_ef})

$$I_{T_ef} = I_{A(1)} \cdot \sqrt{\frac{1}{8} + \frac{2 \cdot M_C}{3 \cdot \pi \cdot \sqrt{3}} \cdot \cos \varphi_N} \quad (2.70)$$

$$I_{T_ef} = 134 \cdot \sqrt{\frac{1}{8} + \frac{2 \cdot 0,866}{16,324} \cdot 0,92} = 63,2 \text{ A}$$

Střední hodnota proudu tranzistoru (I_{T_str})

$$I_{Tr_str} = I_{A(1)} \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot \pi} + \frac{M_C}{4 \cdot \sqrt{3}} \cdot \cos \varphi_N \right) \quad (2.71)$$

$$I_{T_str} = 134 \cdot (0,159 + 0,125 \cdot 0,92) = 36,7 \text{ A}$$

Efektivní hodnota proudu nulové diody (I_{D_ef})

$$I_{D_ef} = I_{A(1)} \cdot \sqrt{\frac{1}{8} - \frac{2 \cdot M_C}{3 \cdot \pi \cdot \sqrt{3}} \cdot \cos \varphi_N} \quad (2.72)$$

$$I_{D_ef} = 134 \cdot \sqrt{\frac{1}{8} - \frac{2 \cdot 0,866}{16,324} \cdot 0,92} = 22,5 \text{ A}$$

Střední hodnota proudu nulové diody (I_{D_str})

$$I_{D_str} = I_{A(1)} \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot \pi} - \frac{M_C}{4 \cdot \sqrt{3}} \cdot \cos \varphi_N \right) \quad (2.73)$$

$$I_{D_str} = 134 \cdot (0,159 - 0,125 \cdot 0,92) = 6 \text{ A}$$

Na základě výše uvedených výpočtů byl vybrán blok tranzistoru IGBT s integrovanou nulovou diodou s typovým označením **SKM 400 GA 176D** [14] (s dostatečnou proudovou i napětovou rezervou) pro možnost případného konstrukčního řešení a možnost výpočtu ztrát napětového střídače v rámci nepřímého měniče kmitočtu.

Výpočty je možno realizovat pomocí numerické metody, pomocí výpočtu v programu Semisel Simulation nebo prostřednictvím simulací v programu Matlab-Simulink.

Pro případné konstrukční řešení vstupního neřízeného usměrňovače v rámci nepřímého měniče kmitočtu byl vybrán blok **SKKE 1200** [14] (rovněž zde s dostatečnou proudovou i napětovou rezervou). Jako příklad výpočtu ztrát byla u tohoto usměrňovače provedena dle zadaných parametrů výpočetní operace pouze v programu Semisel Simulation.

2.8 Výpočet hlavních ztrát měniče kmitočtu pro sestavení jeho simulačních bloků ztrát [12]

Celkové ztráty měniče kmitočtu je možno vypočítat jako součet ztrát napěťového střídače a ztrát vstupního neřízeného usměrňovače. Výpočet je zde řešen pro jmenovité hodnoty MK.

1) Výpočet ztrát napěťového střídače:

A) Numerický výpočet ztrát napěťového střídače pomocí výše odvozených vztahů a parametrů dle katalogu

Základní parametry dle katalogu potřebné pro numerický výpočet ztrát napěťového střídače v rámci měniče kmitočtu

Tranzistor IGBT			
Parametr	Označení	Hodnota	Veličina
Max. hodnota napětí C - E	U_{CES}	1700	V
Kolektorový proud	I_C	300	A
Max. hodnota propustného proudu	I_{CRM}	600	A
Prahové napětí ($U_{CE0} = U_{PT}$)	U_{PT}	1,1	V
Dynamický odpor ($r_{CE} = r_{dT}$)	r_{dT}	6,0	mΩ
Energie spínací	E_{ON}	170	mJ
Energie vypínací	E_{OFF}	118	mJ
Energie celková ($E_T = E_{ON} + E_{OFF}$)	E_T	288	mJ

Nulová dioda			
Parametr	Označení	Hodnota	Veličina
Hodnota proudu nulové diody	I_F	300	A
Prahové napětí ($U_{F(th)} = U_{PD}$)	U_{PD}	1,1	V
Dynamický odpor ($r_F = r_{dD}$)	r_{dD}	3,0	mΩ
Energie celková ($E_{Tr} = E_D$)	E_D	78	mJ

Celkové ztráty napěťového střídače je možno dále vypočítat jako součet ztrát vedením na tranzistorech a nulových diodách a ztrát přepínacích na jednotlivých tranzistorech a nulových diodách.

a) Výpočet ztrát vedením v tranzistorech a nulových diodách

Ztráty vedením jednoho tranzistoru IGBT (ΔP_{VedT1_NS})

$$\Delta P_{VedT1_NS} = U_{PT} \cdot I_{T_str} + r_{dT} \cdot I_{T_ef}^2 \quad (2.74)$$

$$\Delta P_{VedT1_NS} = 1,1 \cdot 36,7 + 6,0 \cdot 10^{-3} \cdot 63,2^2 = 64,4 \text{ W}$$

Ztráty vedením jedné nulové diody (ΔP_{VedD1_NS})

$$\Delta P_{VedD1_NS} = U_{PD} \cdot I_{D_str} + r_{dD} \cdot I_{D_ef}^2 \quad (2.75)$$

$$\Delta P_{VedD1_NS} = 1,1 \cdot 6 + 3 \cdot 10^{-3} \cdot 22,5^2 = 8,2 \text{ W}$$

Celkové ztráty vedením napět'ového střídače (ΔP_{Ved_NS})

$$\Delta P_{Ved_NS} = 6 \cdot (P_{VedT1_NS} + P_{VedD1_NS}) \quad (2.76)$$

$$\Delta P_{Ved_NS} = 6 \cdot (64,4 + 8,2) = \underline{435,6 \text{ W}}$$

b) Výpočet ztrát přepínacích na tranzistorech a nulových diodách

Ztráty přepínací jednoho tranzistoru IGBT (ΔP_{PrT1_NS})

$$\Delta P_{PrT1_NS} = \frac{1}{\pi} \cdot f_{SP} \cdot K_1 \cdot (E_{ON} + E_{OFF}) = \frac{1}{\pi} \cdot f_{SP} \cdot K_1 \cdot E_T \quad (2.77)$$

Činitel proudového využití tranzistoru – K_1

$$K_1 = \frac{I_{A(1)}}{I_C} = \frac{134}{300} = 0,45 \quad (2.78)$$

$$\Delta P_{PrT1_NS} = 0,318 \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 0,45 \cdot 288 \cdot 10^{-3} = 82,5 \text{ W}$$

Ztráty přepínací jedné nulové diody (ΔP_{PrD1_NS})

$$\Delta P_{PrD1_NS} = \frac{1}{\pi} \cdot f_S \cdot K_2 \cdot E_D \quad (2.79)$$

Činitel proudového využití nulové diody – K_2

$$K_2 = \frac{I_{A(1)}}{I_F} = \frac{134}{300} = 0,45 \quad (2.80)$$

$$\Delta P_{PrD1_NS} = 0,318 \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 0,45 \cdot 78 \cdot 10^{-3} = 22,3 \text{ W}$$

Celkové ztráty přepínací napět'ového střídače (ΔP_{Pr_NS})

$$\Delta P_{Pr_NS} = 6 \cdot (\Delta P_{PrT1_NS} + \Delta P_{PrD1_NS}) \quad (2.81)$$

$$\Delta P_{Pr_NS} = 6 \cdot (82,5 + 22,3) = \underline{628,8 \text{ W}}$$

Celkové ztráty napět'ového střídače – numerický výpočet (ΔP_{NS})

$$\Delta P_{NS} = \Delta P_{Ved_NS} + \Delta P_{Pr_NS} \quad (2.82)$$

$$\Delta P_{NS} = 435,6 + 628,8 = \underline{\underline{1064,4 \text{ W}}}$$

B) Simulační ověření výpočtu ztrát napět'ového střídače vytvořeného na základě výše uvedených vztahů, parametrů dle katalogu a pomocí software Matlab - Simulink

a) celkové ztráty vedením napět'ového střídače (ΔP_{Ved_NS}): 438,4 W

b) celkové ztráty přepínací napět'ového střídače (ΔP_{Pr_NS}): 622,4 W

c) **Celkové ztráty napět'ového střídače (ΔP_{NS})**

$$\Delta P_{NS} = \underline{\underline{1060,8 \text{ W}}}$$

(hodnoty ztrát odečteny z příslušných bloků sestavených v další části pomocí Simulinku)

C) Softwarový výpočet ztrát napěťového střídače pomocí programu Semisel Simulation [14]

Základní parametry bloku SKM 400 GA 176D včetně doplňujících parametrů potřebných pro výpočet ztrát napěťového střídače v rámci měniče kmitočtu pomocí simulačního software

Základní nastavené parametry napěťového střídače			
Parametr	Označení	Hodnota	Veličina
Napětí meziobvodu	U_D	1350	V
Napětí meziobvodu (upravené)	U_{D2}	1632	V
Výstupní napětí střídače	U_{out}	1000	V
Výstupní proud střídače	I_{out}	94,2	A
Výstupní maximální proud střídače	$I_{out\ max}$	134	A
Jmenovitý účinník zátěže střídače	$\cos\varphi$	0,92	—
Výstupní frekvence střídače	f_{out}	50	Hz
Minimální výstupní frekvence střídače	$f_{out\ min}$	2	Hz
Spínací frekvence střídače	f_{sp}	2000	Hz

Parametry tranzistoru IGBT pro výpočet ztrát			
Parametr	Označení	Hodnota	Veličina
Kolektorový proud	I_C	300	A
Prahové napětí	U_{PT}	1,1	V
Dynamický odpor	r_{dT}	6,0	mΩ
Energie celková (spínací a rozpínací)	E_T	288	mJ
Typ chlazení - vodní	WP16_280	14	l/min

Parametry nulové diody pro výpočet ztrát			
Parametr	Označení	Hodnota	Veličina
Hodnota proudu nulové diody	I_F	300	A
Prahové napětí	U_{PD}	1,1	V
Dynamický odpor	r_{dD}	3,0	mΩ
Energie celková	E_D	78	mJ
Typ chlazení - vodní	WP16_280	14	l/min

Celkové ztráty napěťového střídače - v Semisel Simulation (ΔP_{totNS})

$$P_{totNS} = \Delta P_{NS} = 1070\ W$$

Ztráty napěťového střídače byly řešeny pomocí tří různých metod výpočtu. Porovnáním jednotlivých výsledků je možno vysledovat, že rozdíly jsou minimální a je tak možno v případě návrhu řešení konkrétního měniče kmitočtu použít s dostatečnou přesností každý z uvedených způsobů výpočtu ztrát napěťového střídače v rámci měniče kmitočtu.

D) Výpočet ztrát vstupního neřízeného usměrňovače [14]

$$P_{totUS} = \Delta P_{US} = 253\ W$$

Celkové ztráty vstupního neřízeného 6-ti pulsního usměrňovače v rámci měniče kmitočtu jsou zde řešeny a vypočtené pomocí simulačního software Semisel Simulation.

Výpočet je realizován jednak pro představu výše hodnoty těchto ztrát při daných výkonových parametrech, a jednak pro doplnění informace pro řešení celkových ztrát měniče kmitočtu.

- 2) **Celkové ztráty měniče kmitočtu dle Semisel Simulation** (mimo konstrukční ztráty a ztráty v napěťovém meziobvodu):

$$\Delta P_{MK} = \Delta P_{NS} + \Delta P_{US}$$

$$\Delta P_{MK} = 1070 + 253 = \underline{\underline{1323 \text{ W}}}$$

2.9 Simulační bloky hlavních ztrát napěťového střídače v rámci měniče kmitočtu

1) Blok ztrát reprezentující ztráty vedením NS včetně odpovídajícího momentu ztrát

Blok a jeho vnitřní zapojení je součástí příloh (příloha č. 10 a č. 11). Vstupem jsou okamžité hodnoty jednotlivých složek proudů a napětí statoru doplněné o napětí v meziobvodu a mechanické otáčky motoru. Výstupem bloku je výsledná hodnota ztrát vedením v napěťovém střídači a odpovídající moment ztrát. Blok ztrát vedením NS byl vytvořen na základě základních vztahů pro tyto ztráty (2.74 až 2.76). Moment ztrát byl řešen dle příslušného vztahu (1.7).

2) Blok ztrát reprezentující ztráty přepínací NS včetně odpovídajícího momentu ztrát

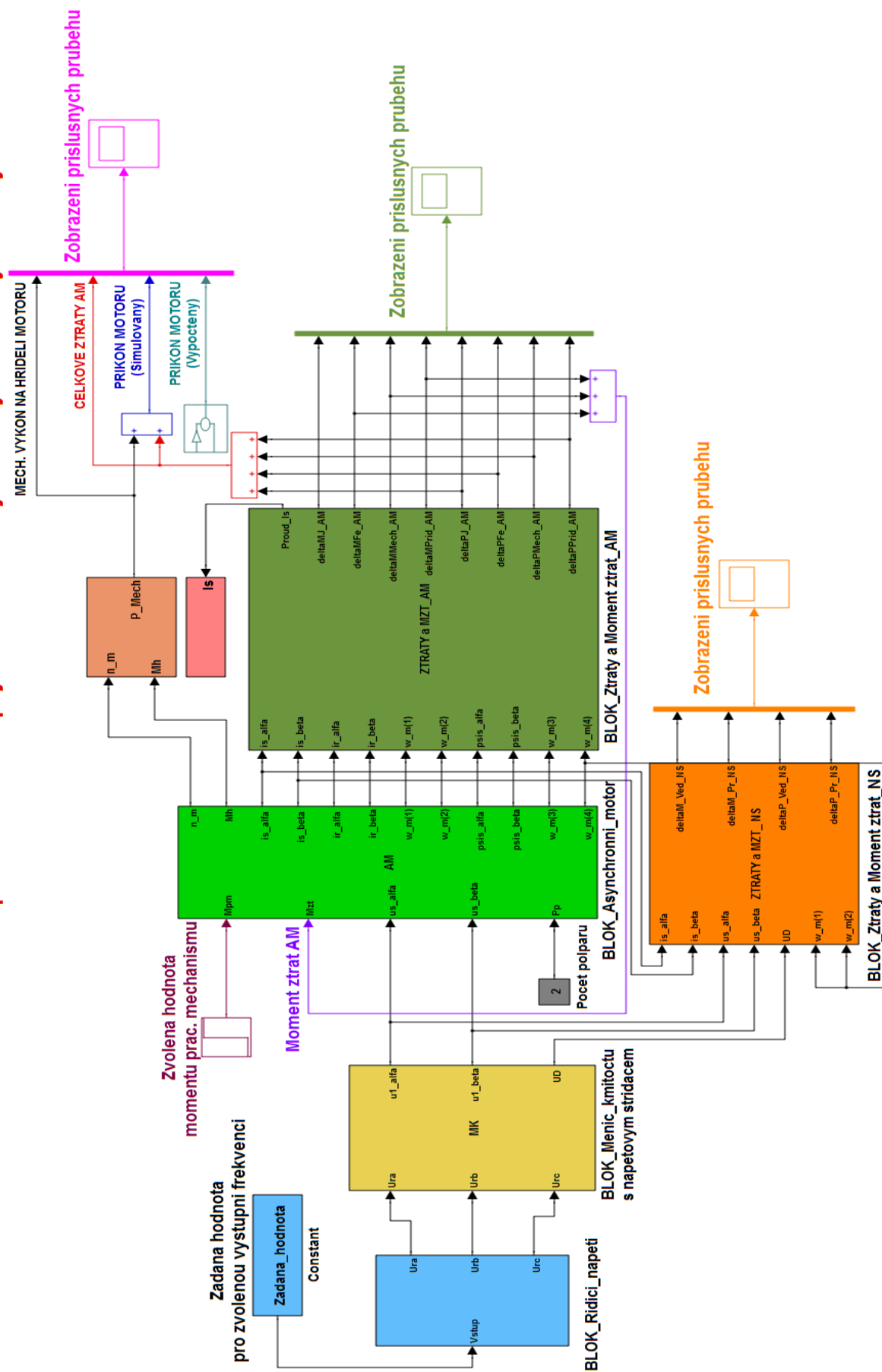
Blok a jeho vnitřní zapojení je součástí příloh (příloha č. 10 a č. 12). Vstupem jsou mechanické otáčky motoru. Výstupem bloku je výsledná hodnota ztrát přepínacích NS a odpovídající moment ztrát. Blok přepínacích ztrát NS byl vytvořen na základě základních vztahů pro tyto ztráty (2.77 až 2.80). Moment ztrát byl řešen dle příslušného vztahu (1.7).

2.10 Základní simulační model sestavy pohonu s asynchronním motorem napájeným z měniče kmitočtu se simulačními bloky ztrát [15]

Tento základní simulační model byl vytvořen v Simulinku a je tvořen následujícími bloky:

- blok generující řídicí napětí pro měnič kmitočtu (kapitola 2.5)
- blok měniče kmitočtu s napěťovým střídačem (kapitola 2.6)
- blok asynchronního motoru:
modifikovaný tokový model motoru (kapitola 2.1.2)
výpočty parametrů motoru pro zadávání dle masky (kapitola 2.2.2)
- blok hlavních ztrát asynchronního motoru (kapitola 2.4)
- blok hlavních ztrát napěťového střídače (kapitola 2.9)
- pomocné bloky a zobrazení příslušných průběhů

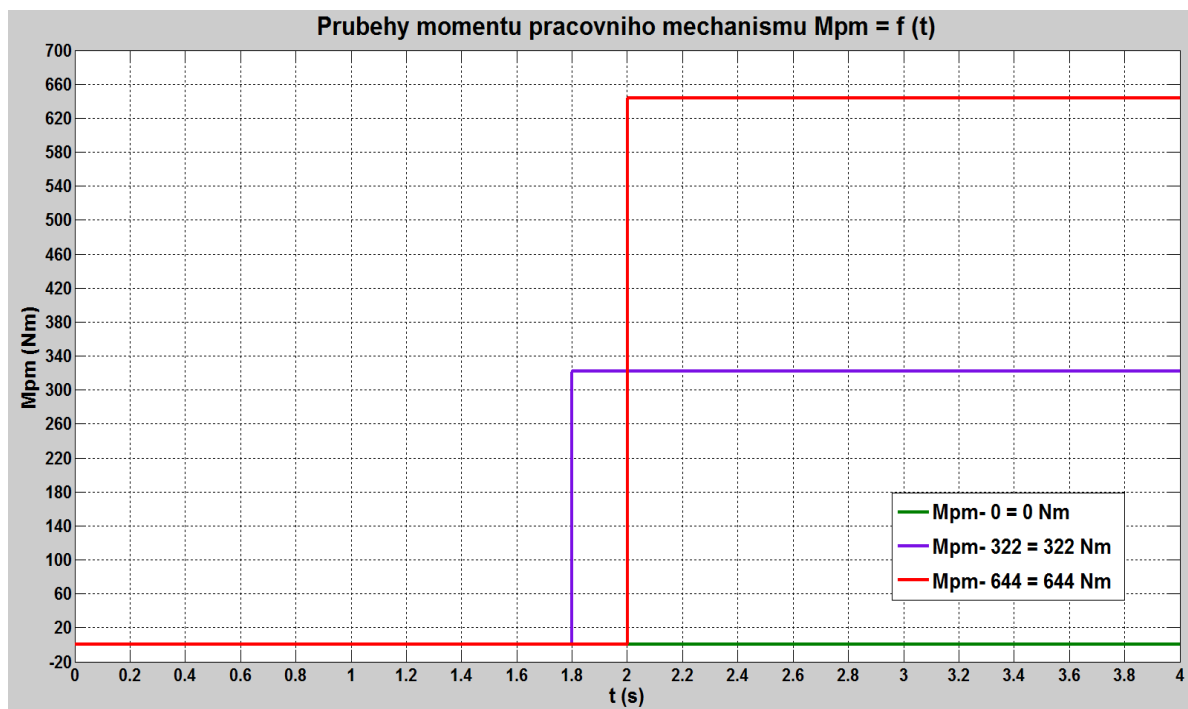
Základní simulační model pohonu s AM napajeného z MK - s jednotlivými celkovými bloky ztrát



Obr. 18 – Základní simulační model sestavy pohonu s příslušnými celkovými bloky ztrát

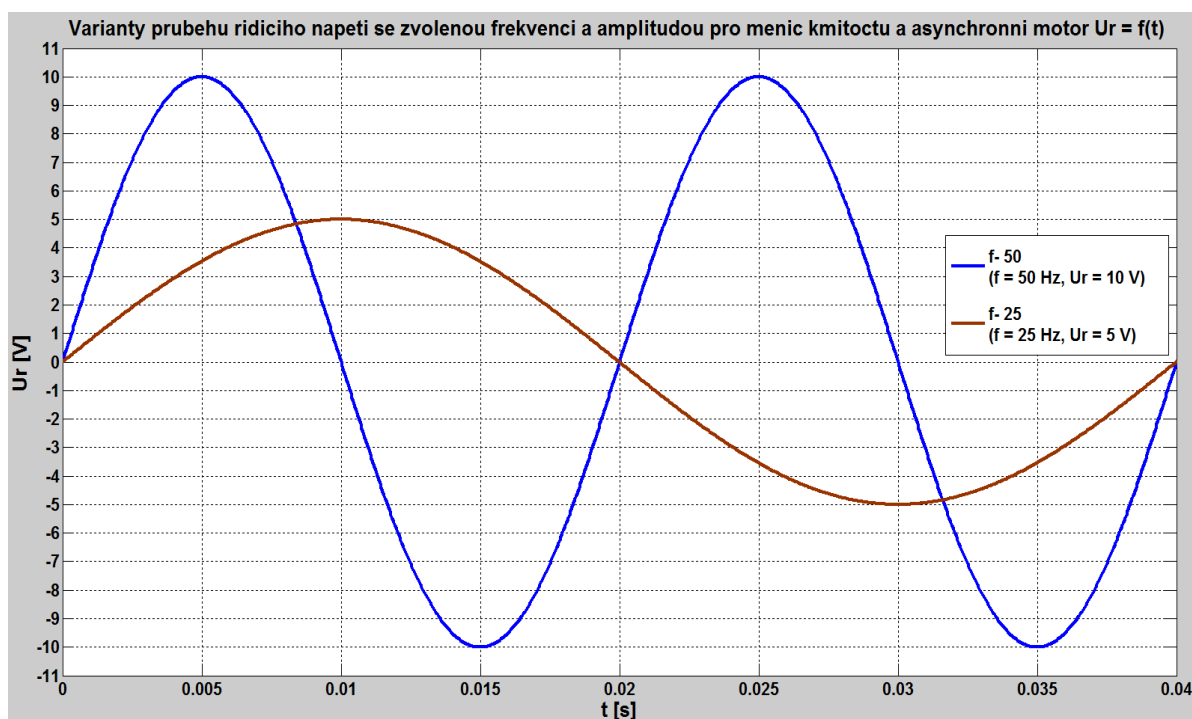
3 Simulační ověření výkonových poměrů pohonu s doplněním simulačních bloků ztrát

3.1 Varianty zvolených průběhů momentu pracovního mechanismu



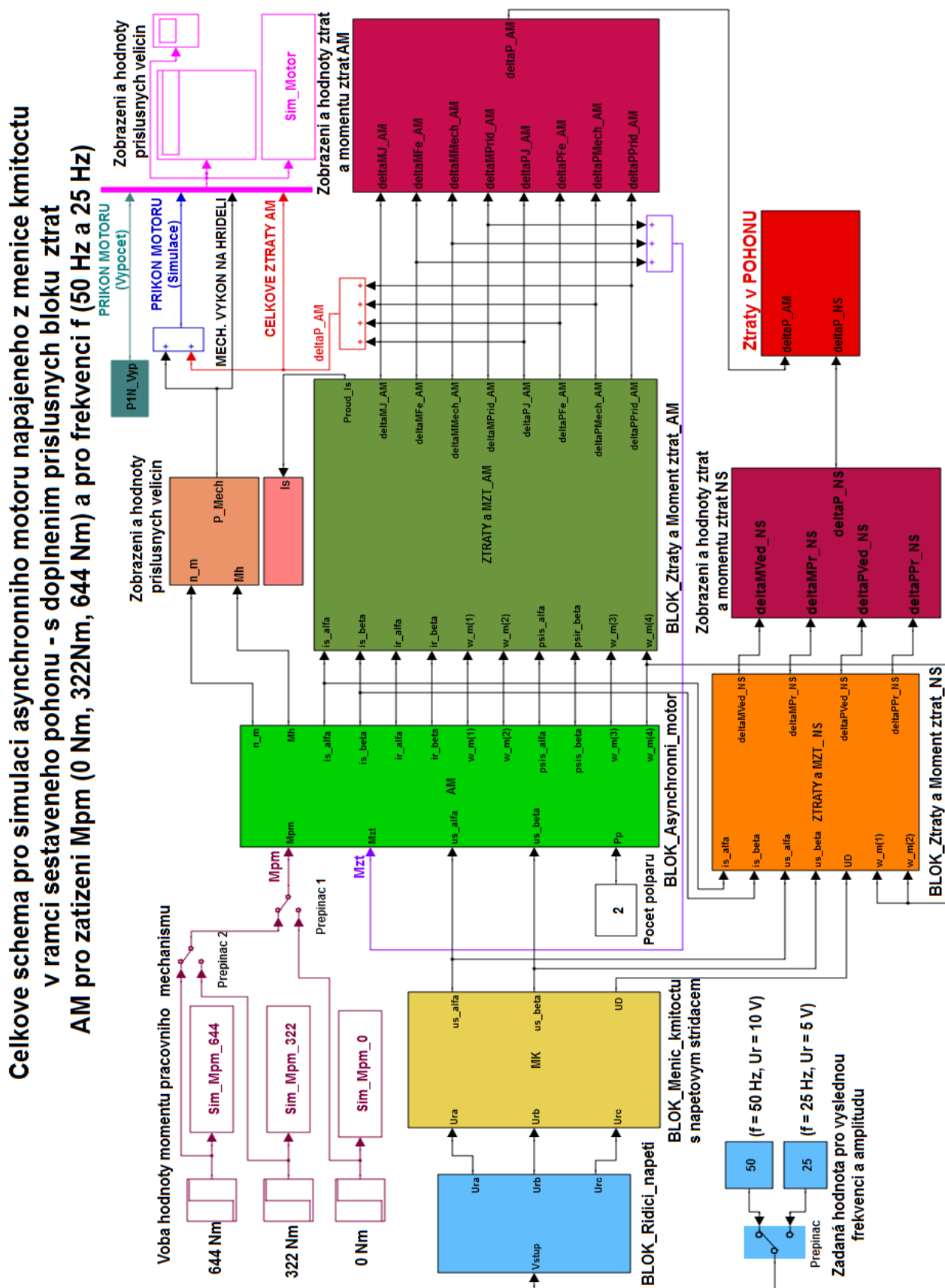
Obr. 19 – Varianty tří zvolených průběhů momentu pracovního mechanismu pro asynchronní motor

3.2 Varianty průběhů řídicího napětí se zvolenou frekvencí



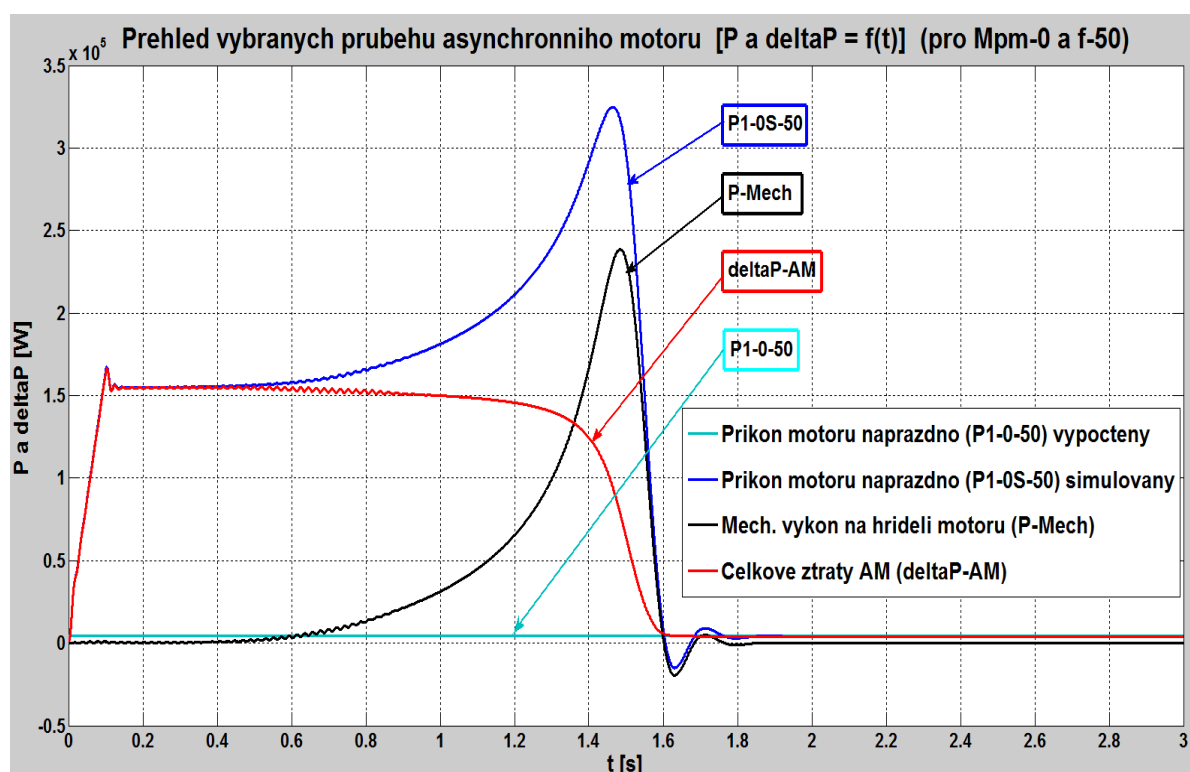
Obr. 20 – Varianty dvou průběhů řídicího napětí se zvolenou frekvencí

3.3 Celkové simulační schéma asynchronního motoru napájeného z měniče kmitočtu pro zvolené hodnoty zatěžovacího momentu a zvolené hodnoty frekvence řídicího napětí

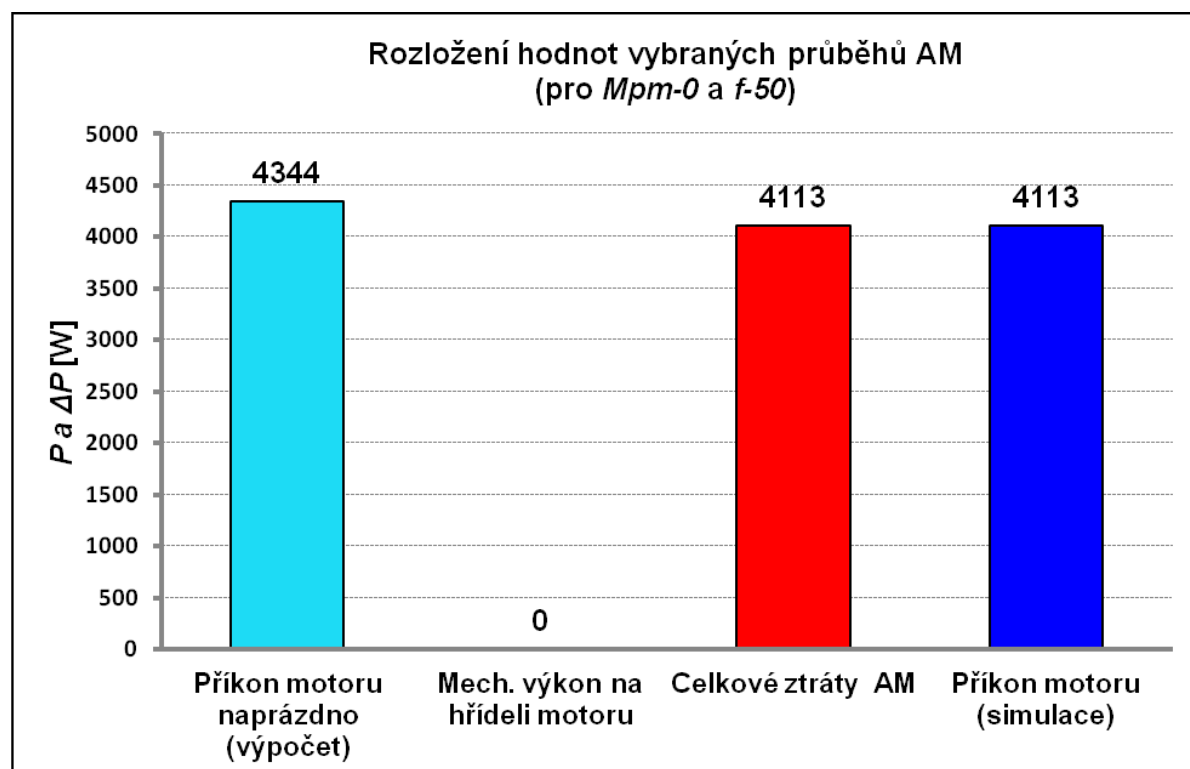


Obr. 21 - Celkové simulační schéma asynchronního motoru napájeného z měniče kmitočtu

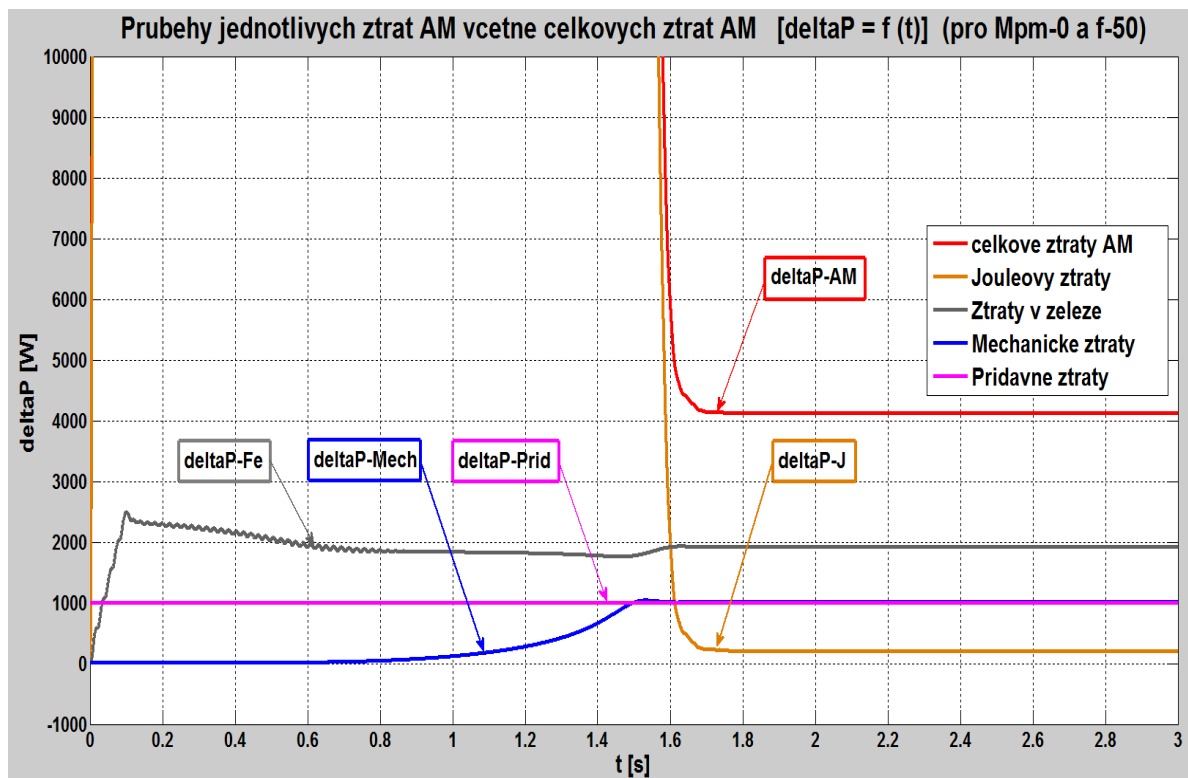
3.4 Jednotlivé průběhy a hodnoty ztrát v rámci daného pohonu (pro *Mpm-0* a *f-50*)



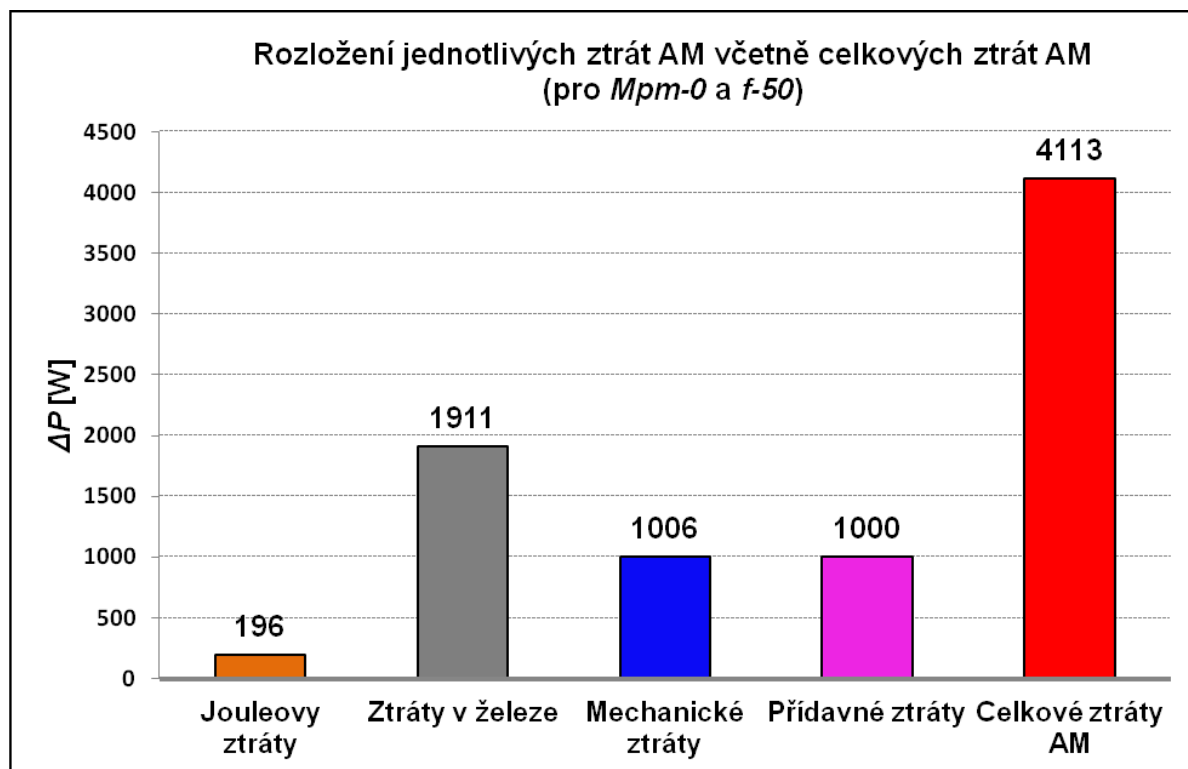
Obr. 22 – Zobrazení přehledu vybraných průběhů asynchronního motoru (*Mpm-0* a *f-50*)



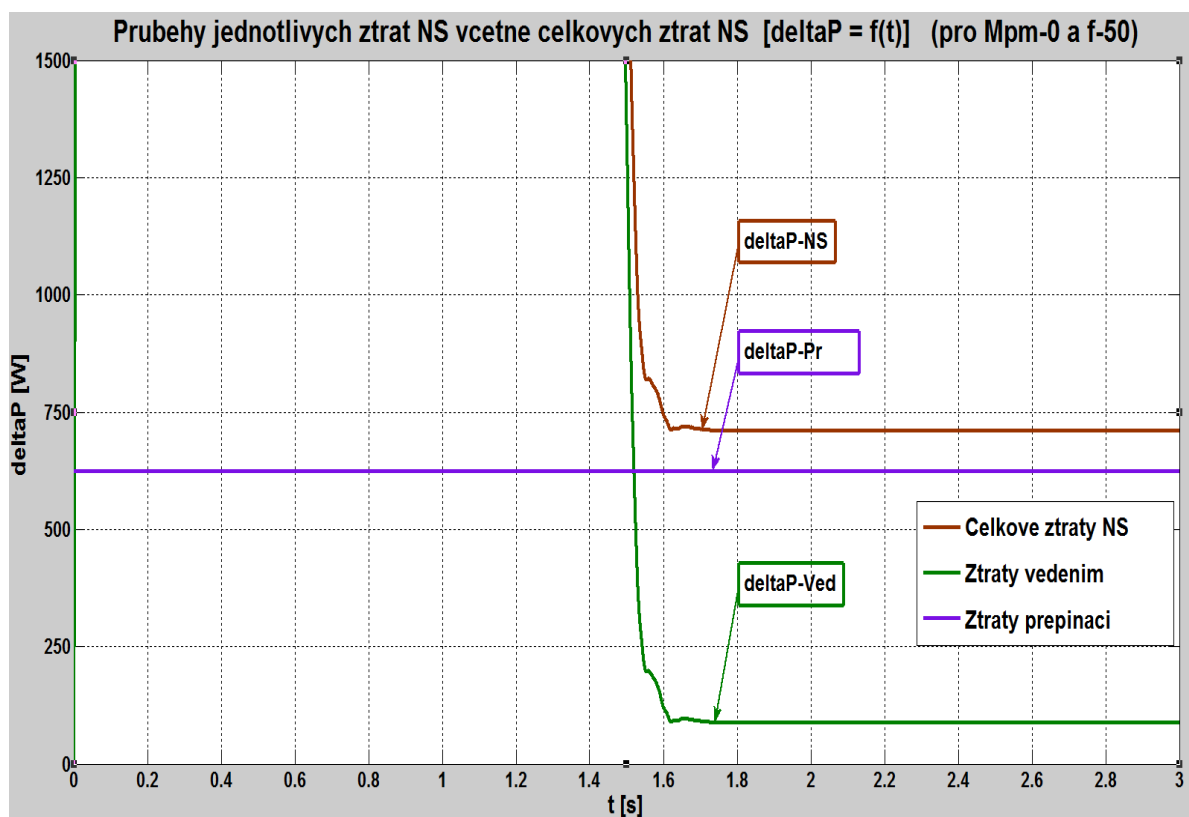
Obr. 23 – Zobrazení rozložení hodnot vybraných průběhů asynchronního motoru pro ustálený stav (*Mpm-0* a *f-50*)



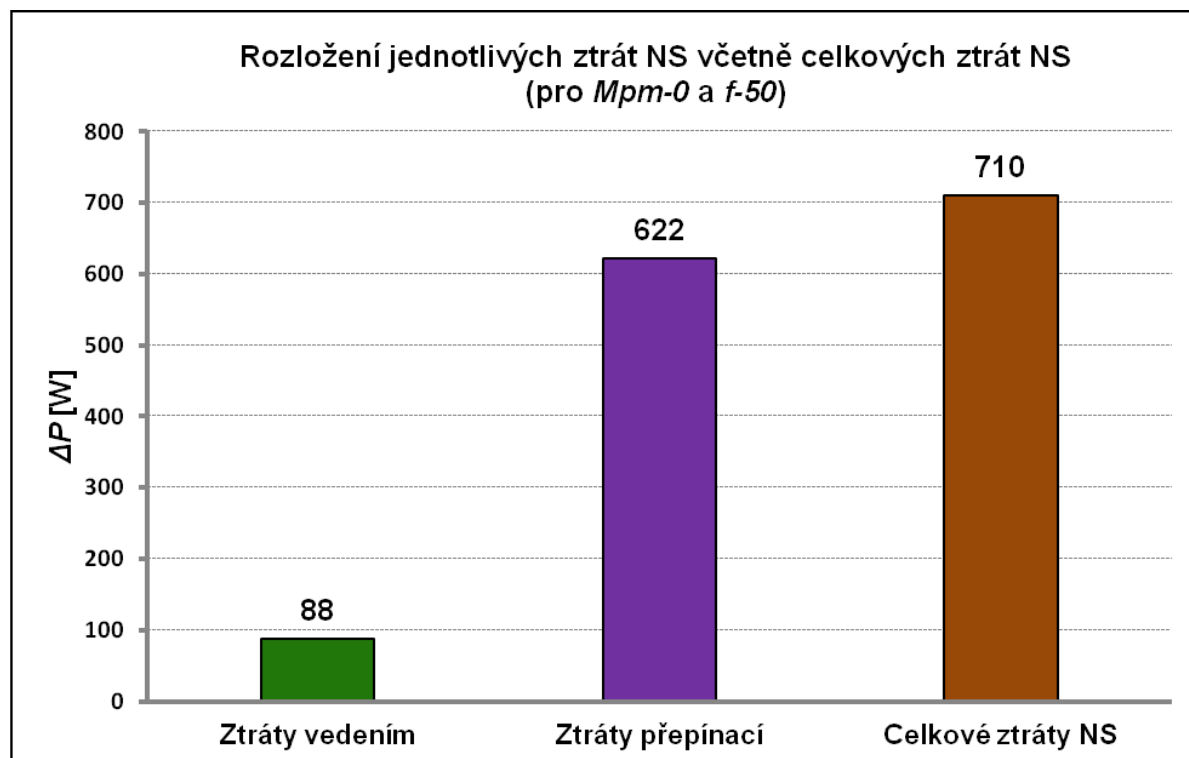
Obr. 24 – Zobrazení průběhů jednotlivých ztrát AM včetně celkových ztrát AM (Mpm-0 a f-50)



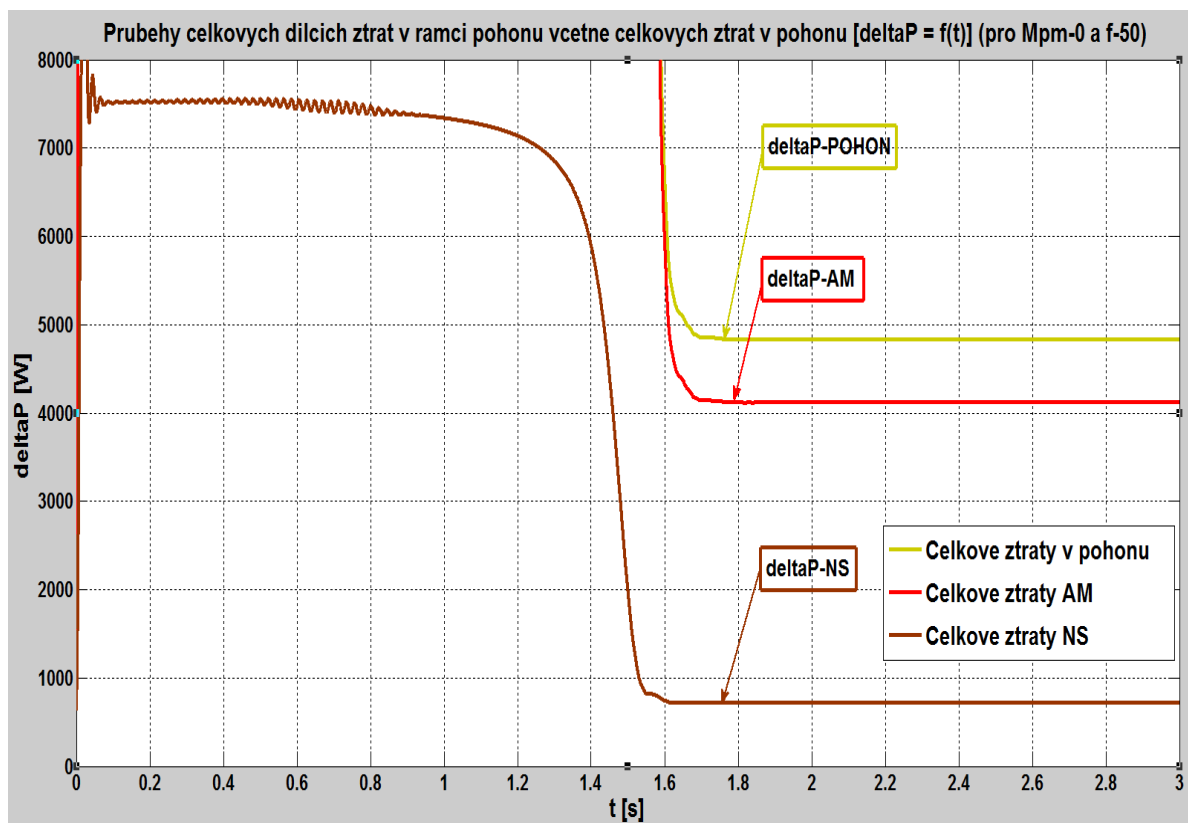
Obr. 25 – Zobrazení rozložení hodnot jednotlivých ztrát AM včetně celkových ztrát AM pro ustálený stav (Mpm-0 a f-50)



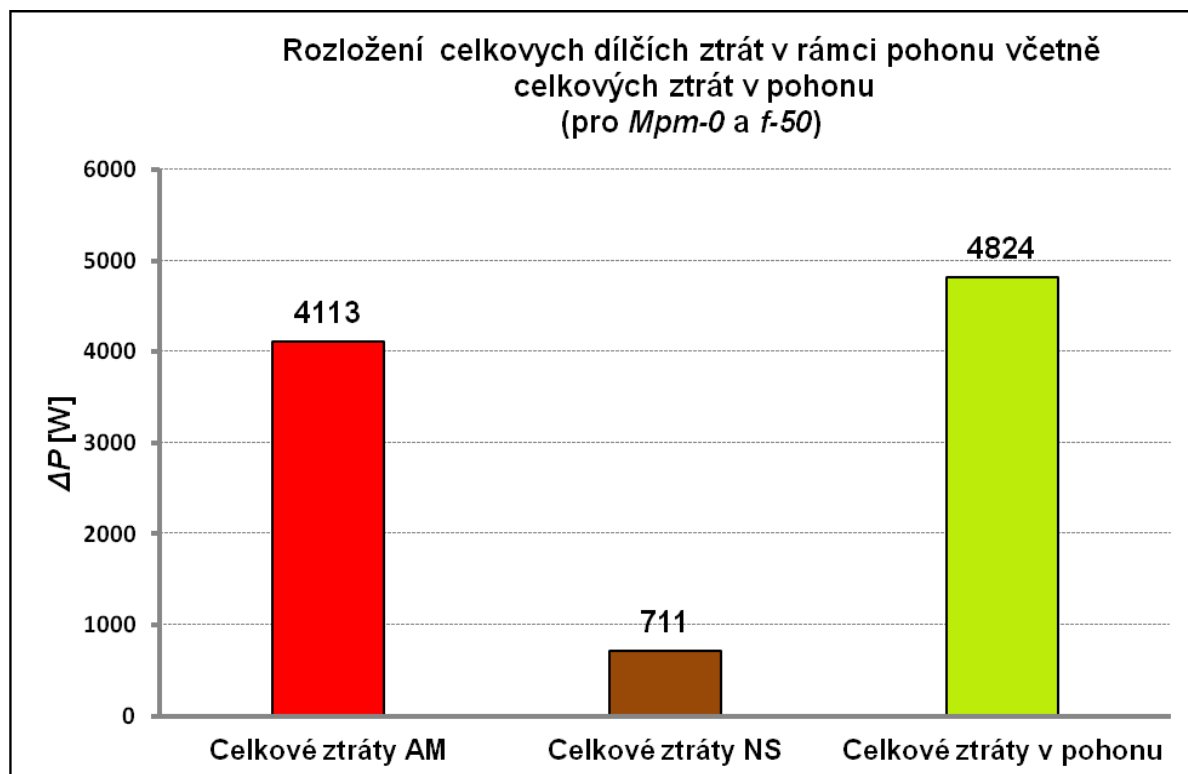
Obr. 26 – Zobrazení přehledu jednotlivých ztrát NS včetně celkových ztrát NS (Mpm-0 a f-50)



Obr. 27 – Zobrazení rozložení hodnot jednotlivých ztrát NS včetně celkových ztrát NS pro ustálený stav (Mpm-0 a f-50)

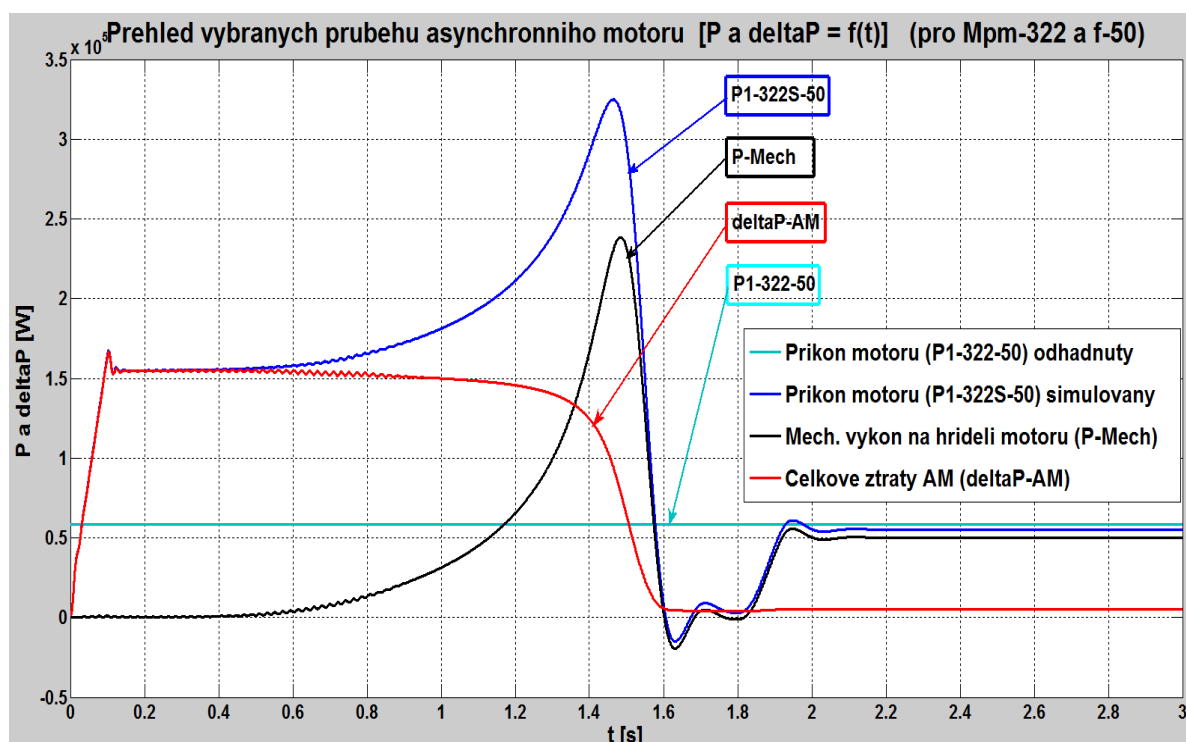


Obr. 28 – Zobrazení průběhů celkových AM, NS včetně celkových ztrát v pohonu (Mpm-0 a f-50)

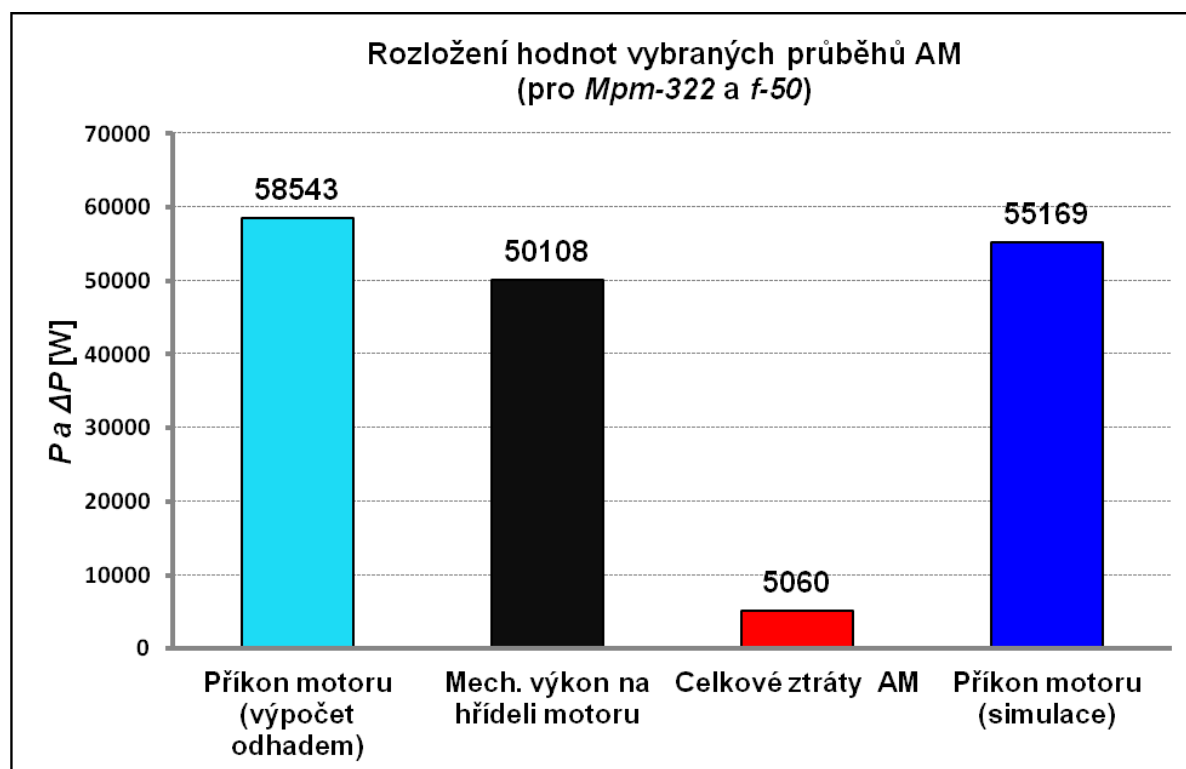


Obr. 29 – Zobrazení rozložení hodnot celkových ztrát AM, NS včetně celkových ztrát v pohonu pro ustálený stav (Mpm-0 a f-50)

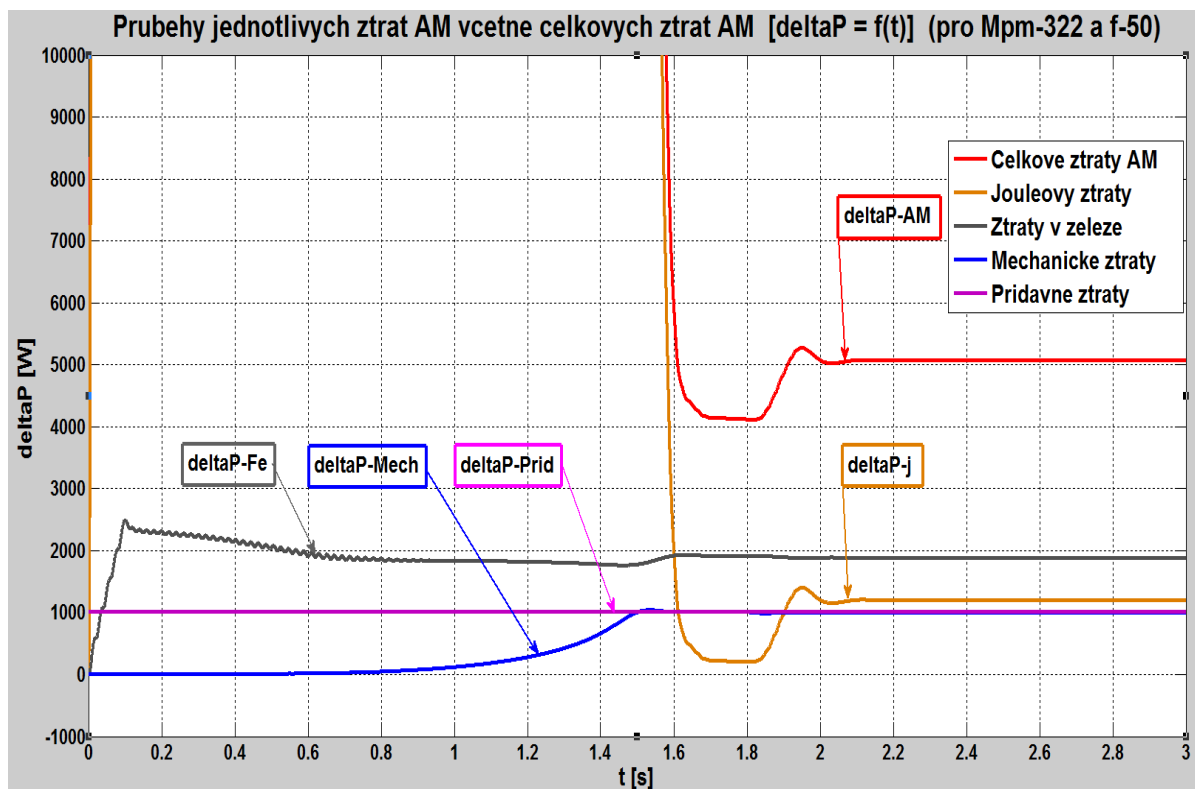
3.5 Jednotlivé průběhy a hodnoty ztrát v rámci daného pohonu (pro *Mpm-322* a *f-50*)



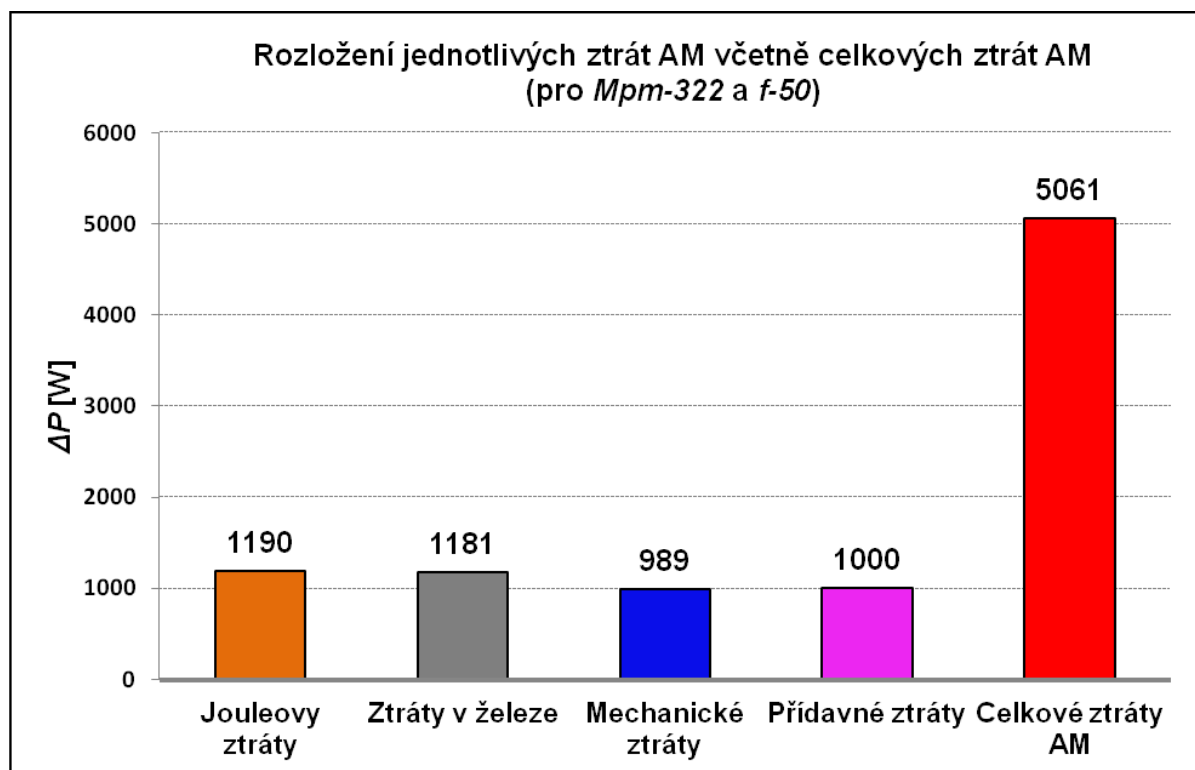
Obr. 30 – Zobrazení přehledu vybraných průběhů asynchronního motoru (*Mpm-322* a *f-50*)



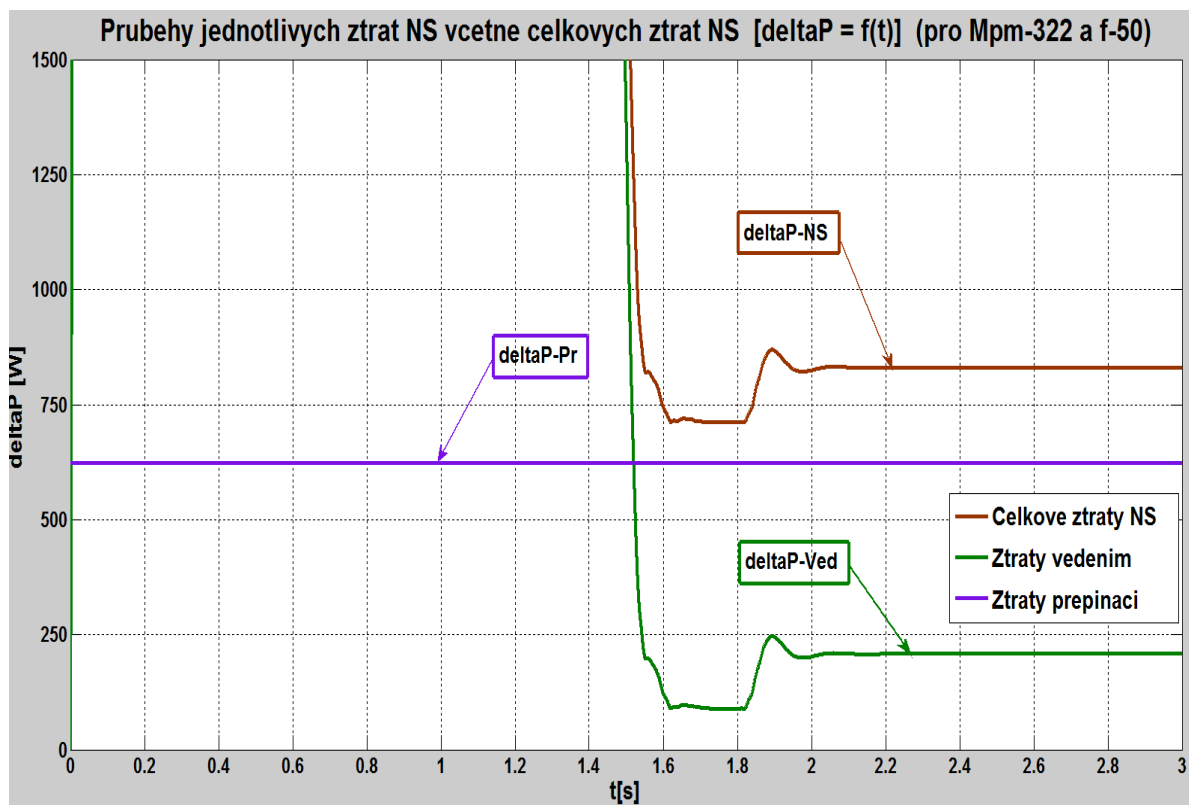
Obr. 31 – Zobrazení rozložení hodnot vybraných průběhů asynchronního motoru pro ustálený stav (*Mpm-322* a *f-50*)



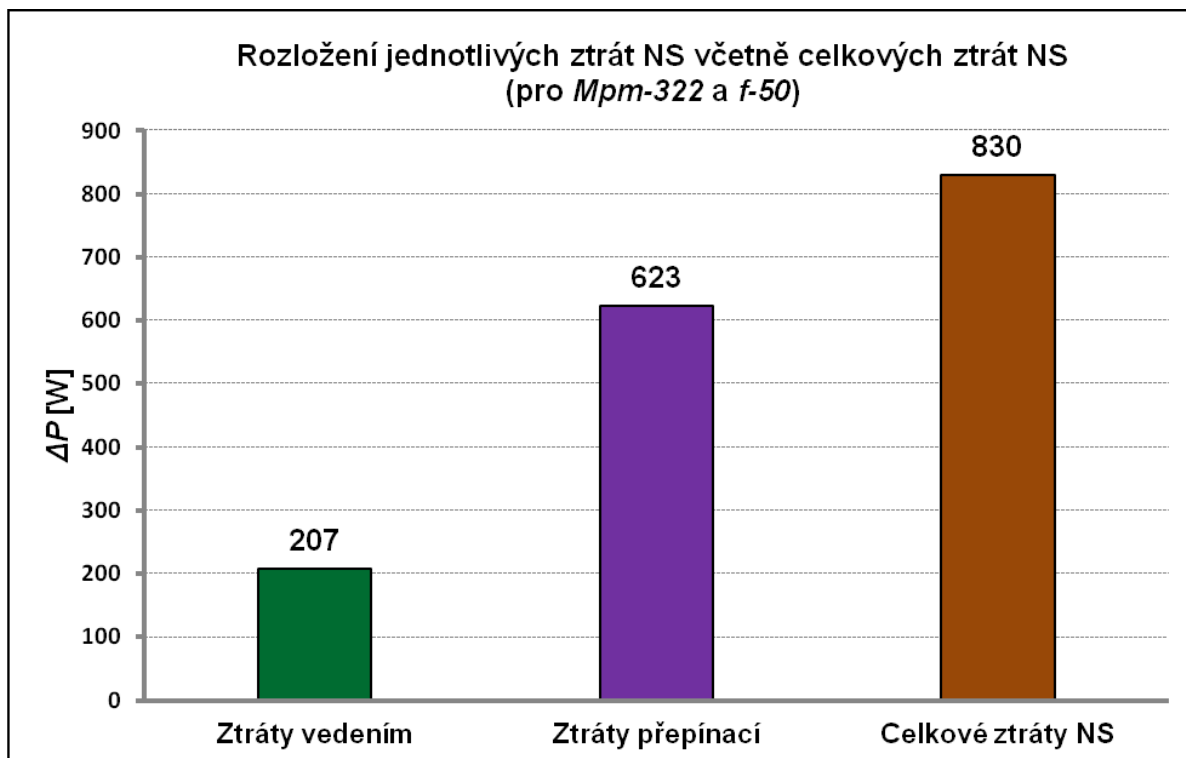
Obr. 32 – Zobrazení průběhů jednotlivých ztrát AM včetně celkových ztrát AM (Mpm-322 a f-50)



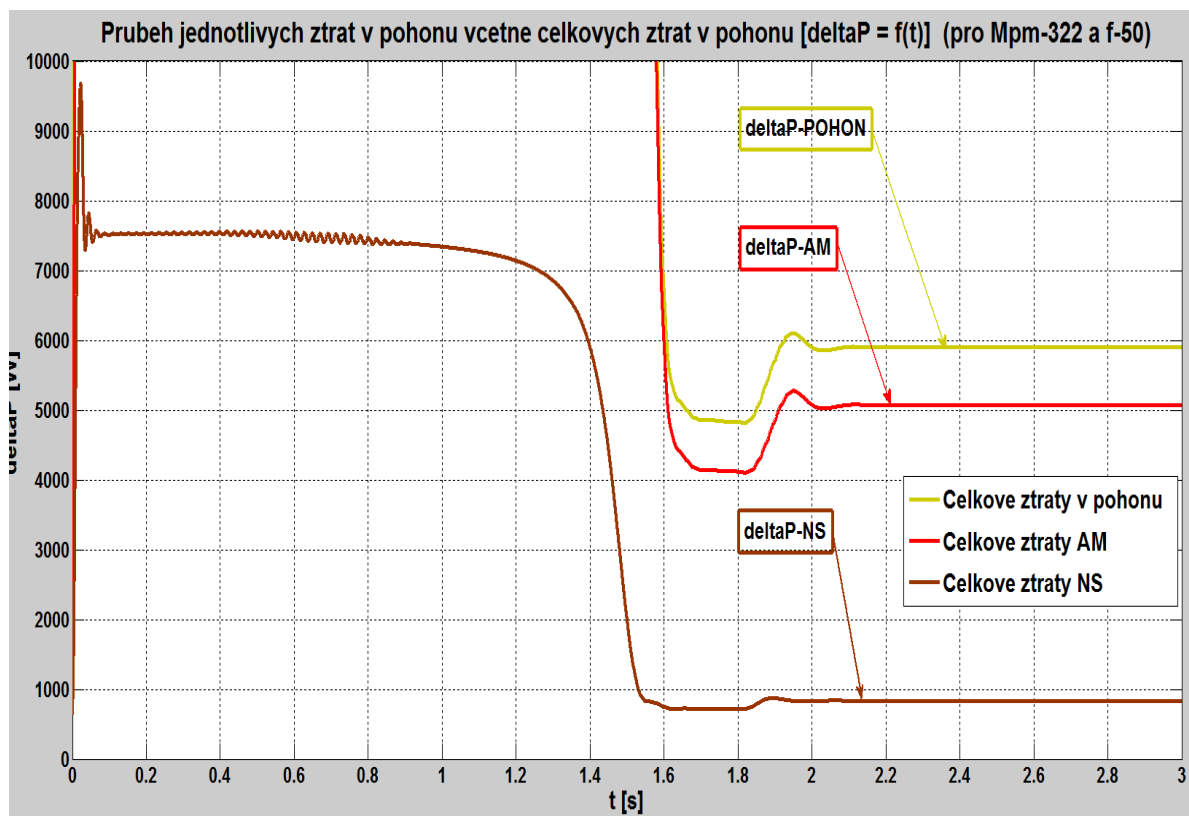
Obr. 33 – Zobrazení rozložení hodnot jednotlivých ztrát AM včetně celkových ztrát AM pro ustálený stav (Mpm-322 a f-50)



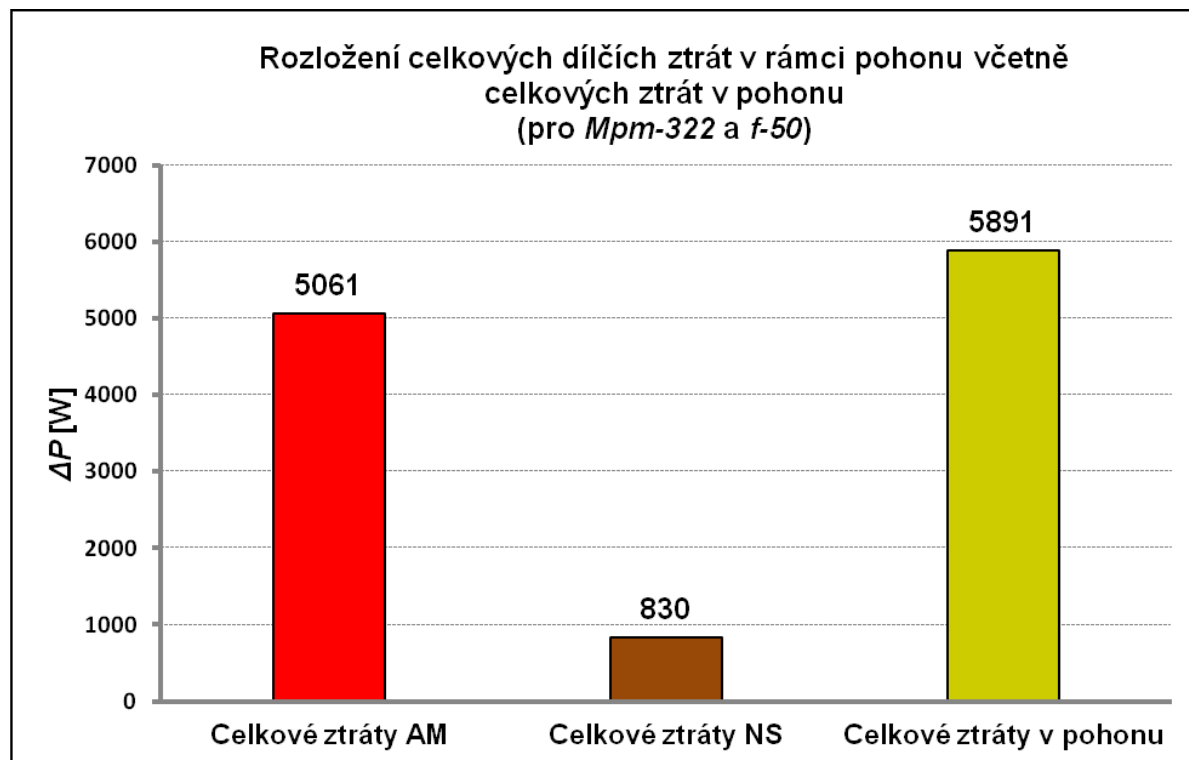
Obr. 34 – Zobrazení průběhů jednotlivých ztrát NS včetně celkových ztrát NS (Mpm-322 a f-50)



Obr. 35 – Zobrazení rozložení hodnot jednotlivých ztrát NS včetně celkových ztrát NS pro ustálený stav (Mpm-322 a f-50)

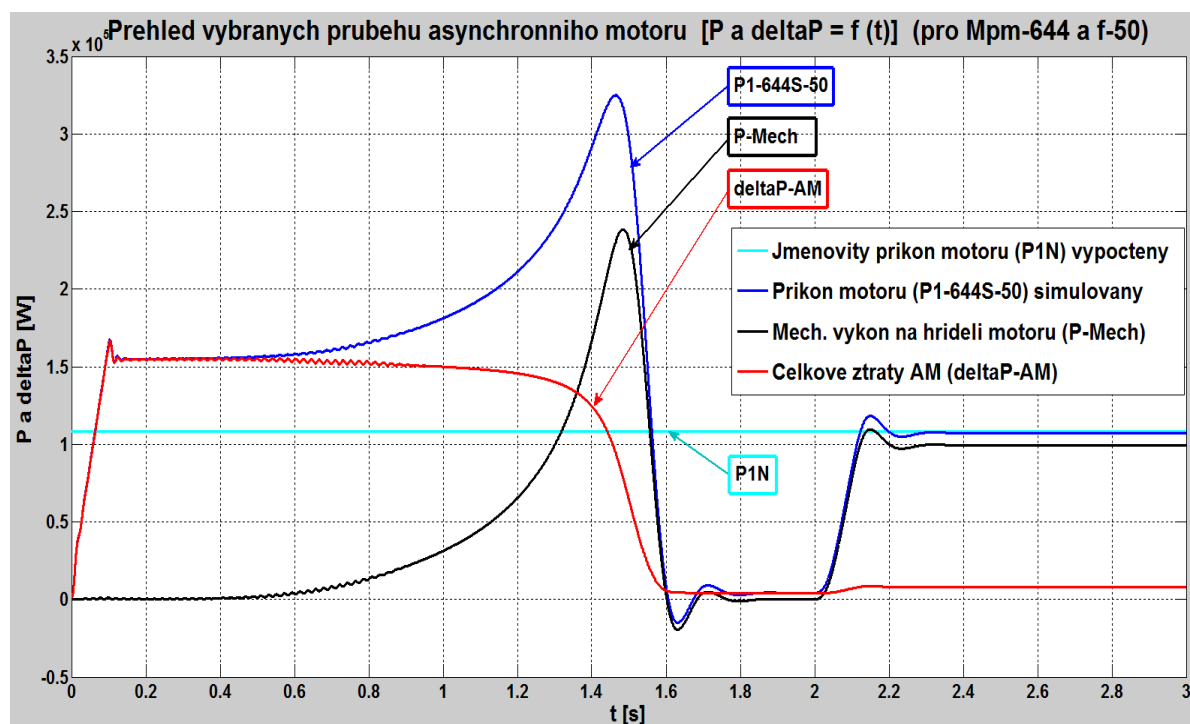


Obr. 36 – Zobrazení průběhů celkových ztrát AM, NS včetně celkových ztrát v pohonu (Mpm-322 a f-50)

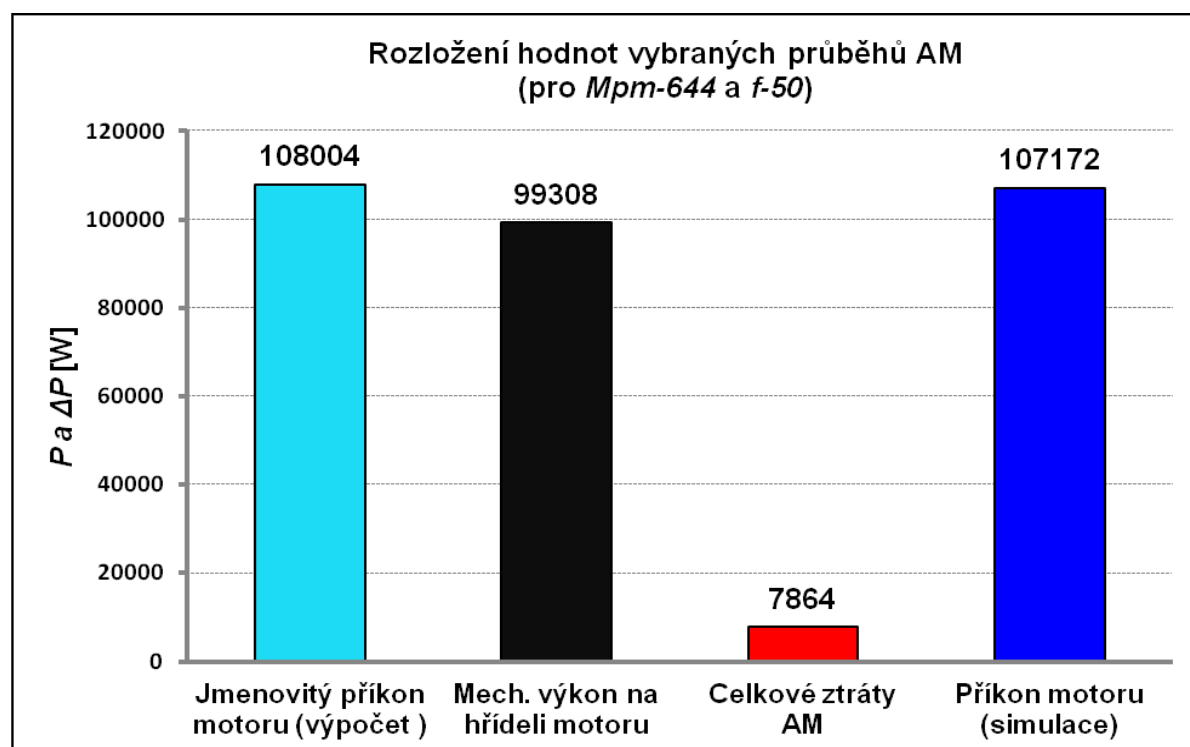


Obr. 37 – Zobrazení rozložení hodnot celkových ztrát AM, NS včetně celkových ztrát v pohonu pro ustálený stav (Mpm-322 a f-50)

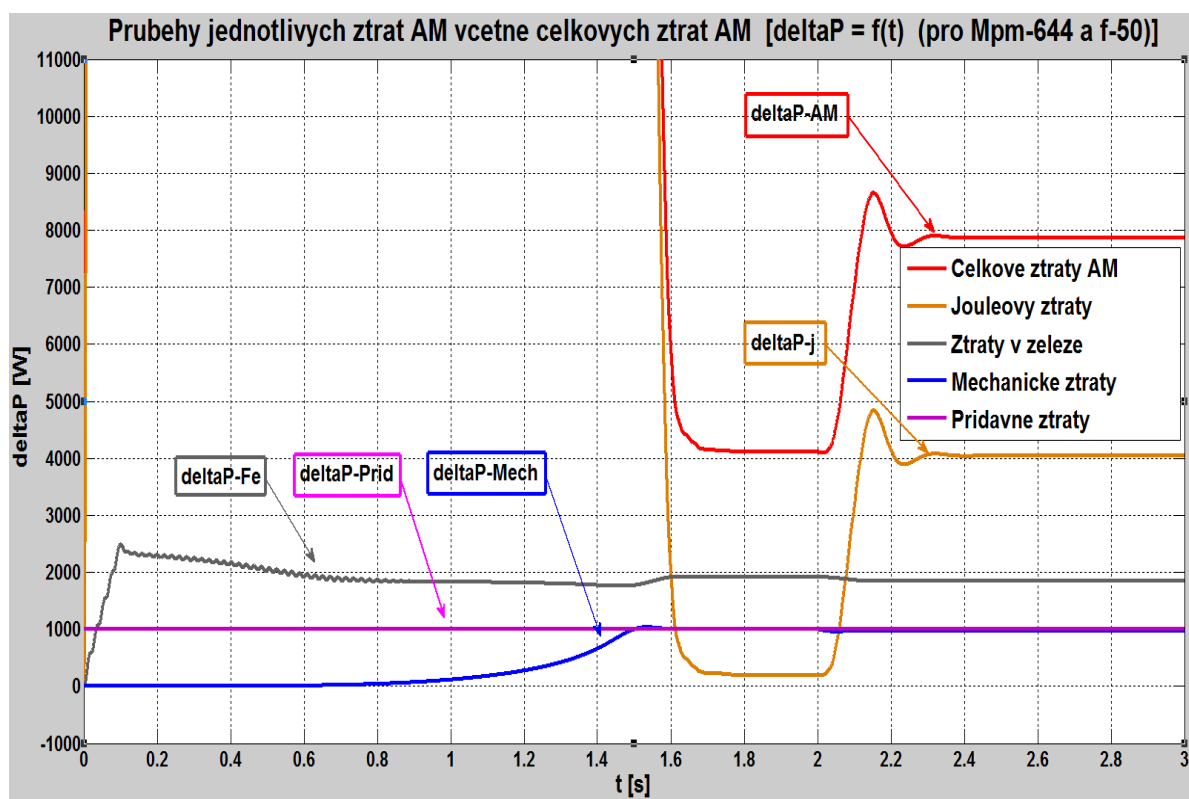
3.6 Jednotlivé průběhy a hodnoty ztrát v rámci daného pohonu (pro *Mpm-644* a *f-50*)



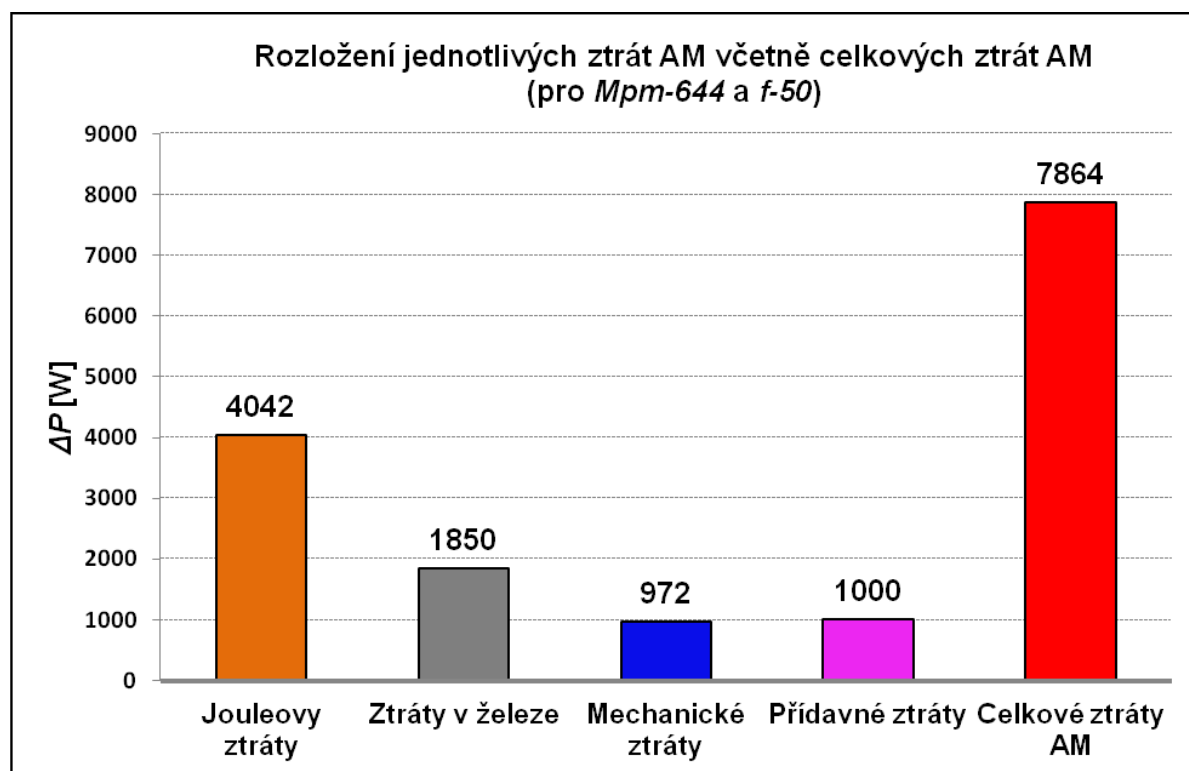
Obr. 38 – Zobrazení přehledu vybraných průběhů asynchronního motoru (*Mpm-644* a *f-50*)



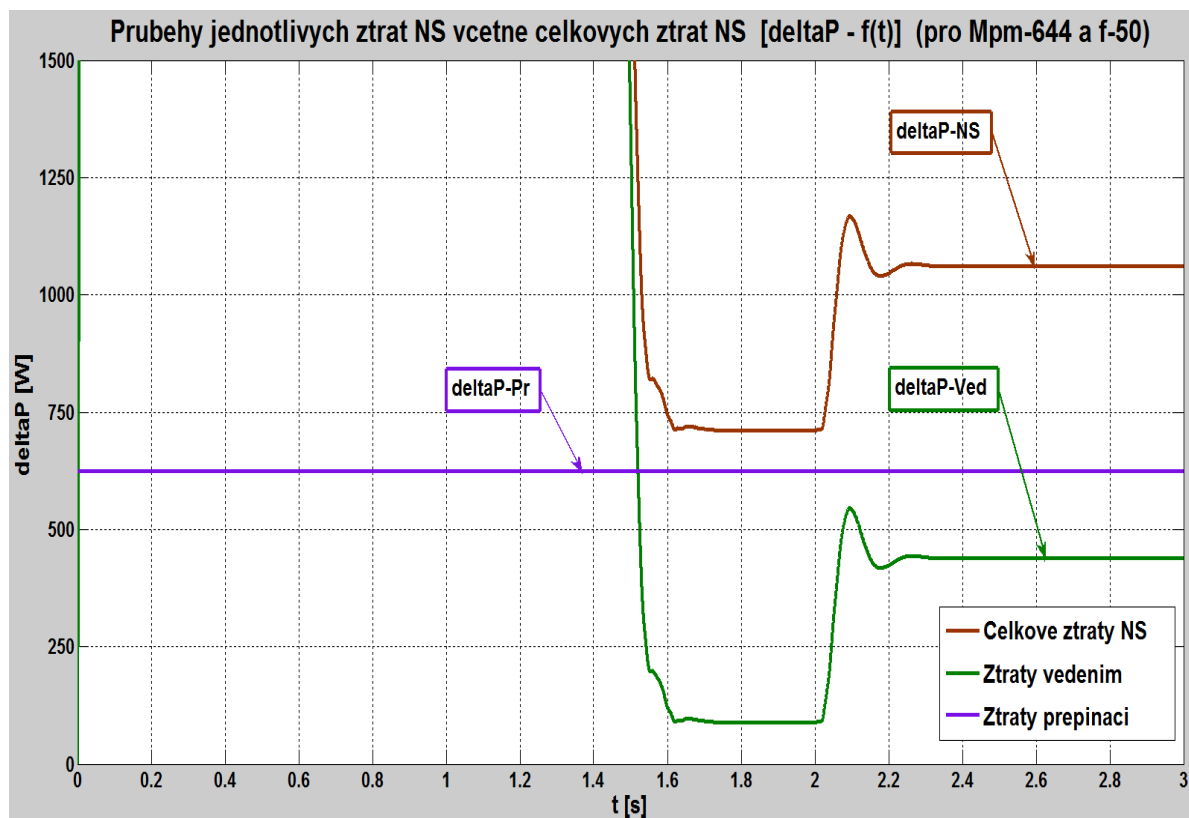
Obr. 39 – Zobrazení rozložení hodnot vybraných průběhů asynchronního motoru pro ustálený stav (*Mpm-644* a *f-50*)



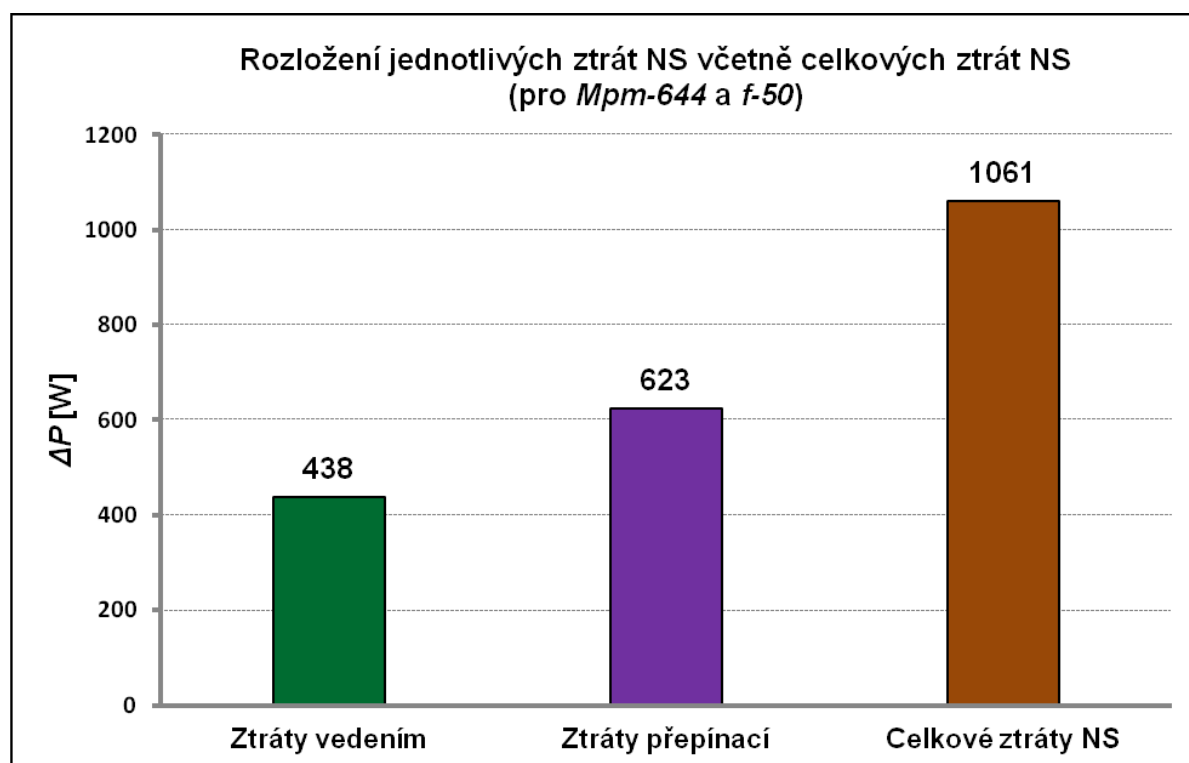
Obr. 40 – Zobrazení průběhů jednotlivých ztrát AM včetně celkových ztrát AM (Mpm-644 a f-50)



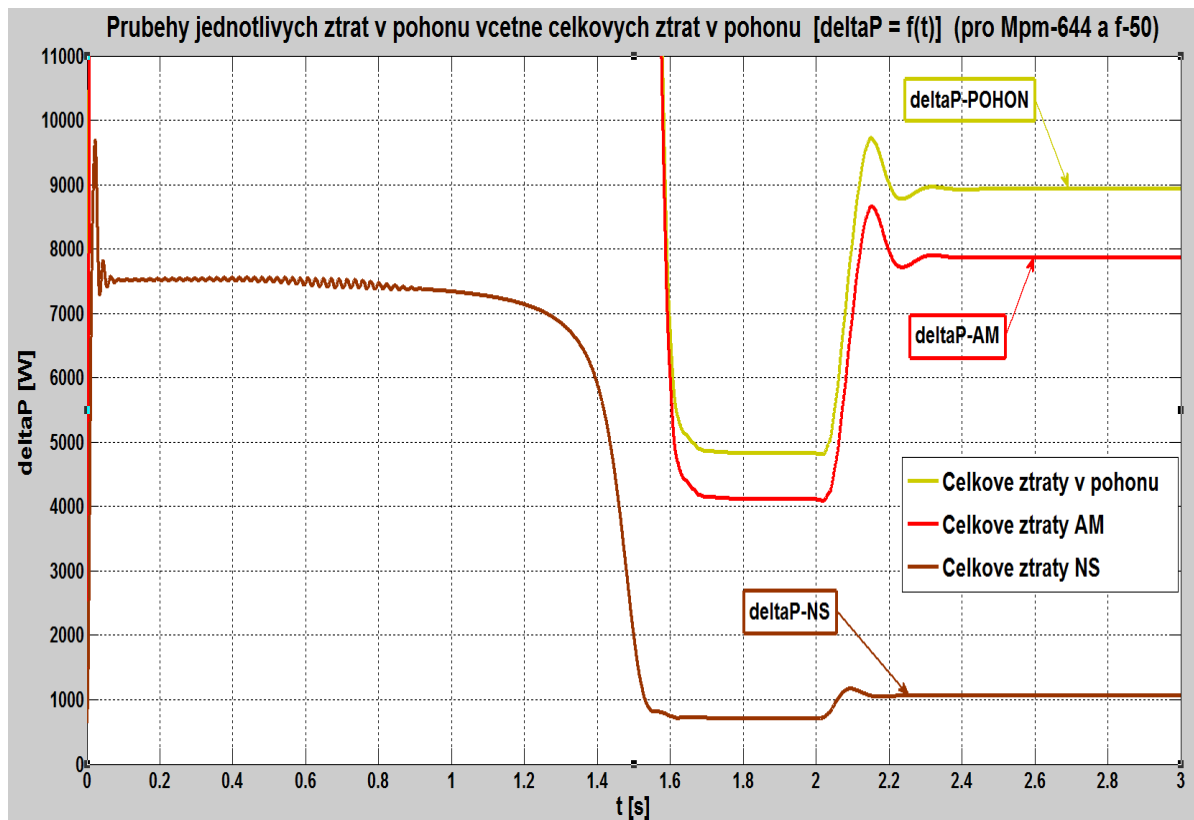
Obr. 41 – Zobrazení rozložení hodnot jednotlivých ztrát AM včetně celkových ztrát AM pro ustálený stav (Mpm-644 a f-50)



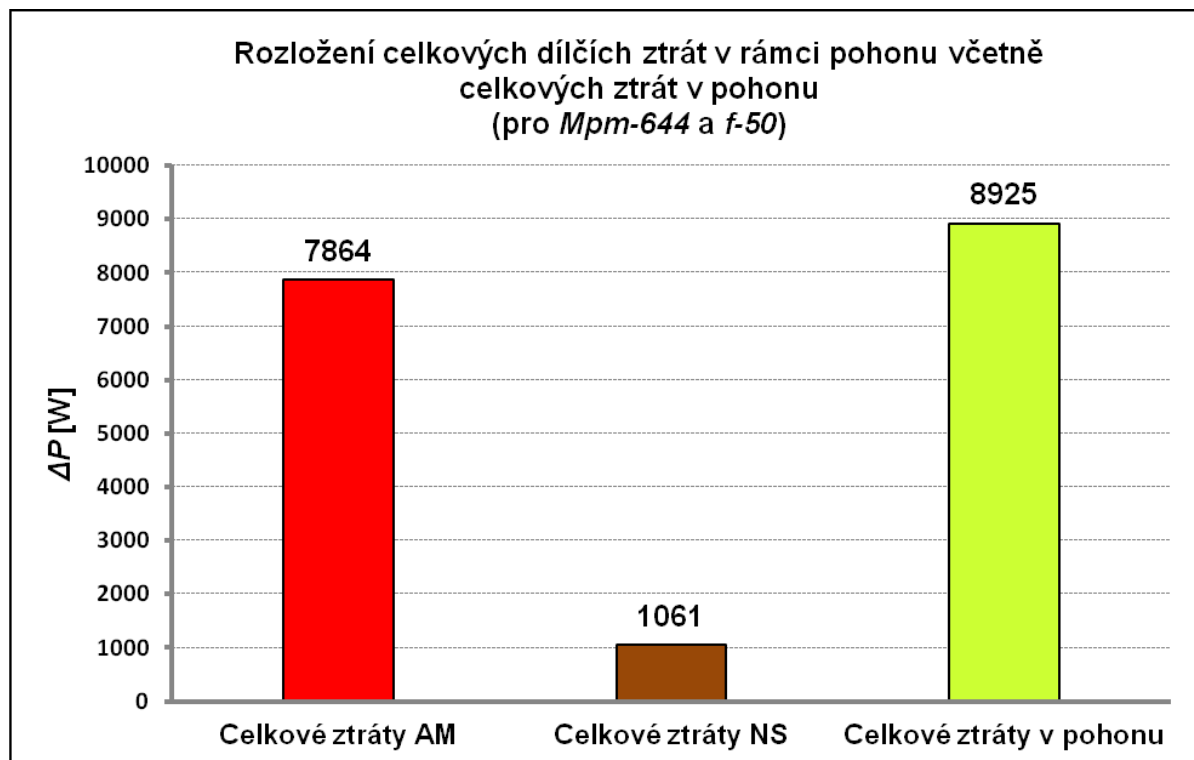
Obr. 42 – Zobrazení průběhů jednotlivých ztrát NS včetně celkových ztrát NS (Mpm-644 a f-50)



Obr. 43 – Zobrazení rozložení hodnot jednotlivých ztrát NS včetně celkových ztrát NS pro ustálený stav (Mpm-644 a f-50)

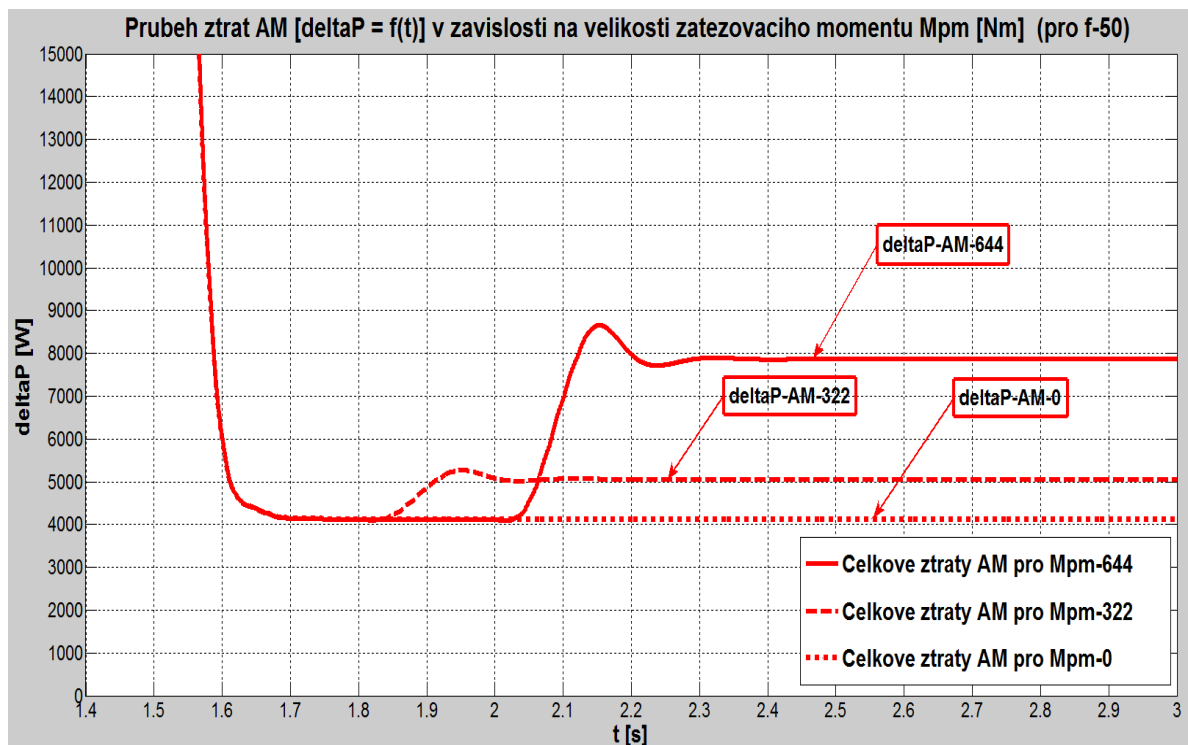


Obr. 44 – Zobrazení průběhů celkových ztrát AM, NS včetně celkových ztrát v pohonu (Mpm-644 a f-50)

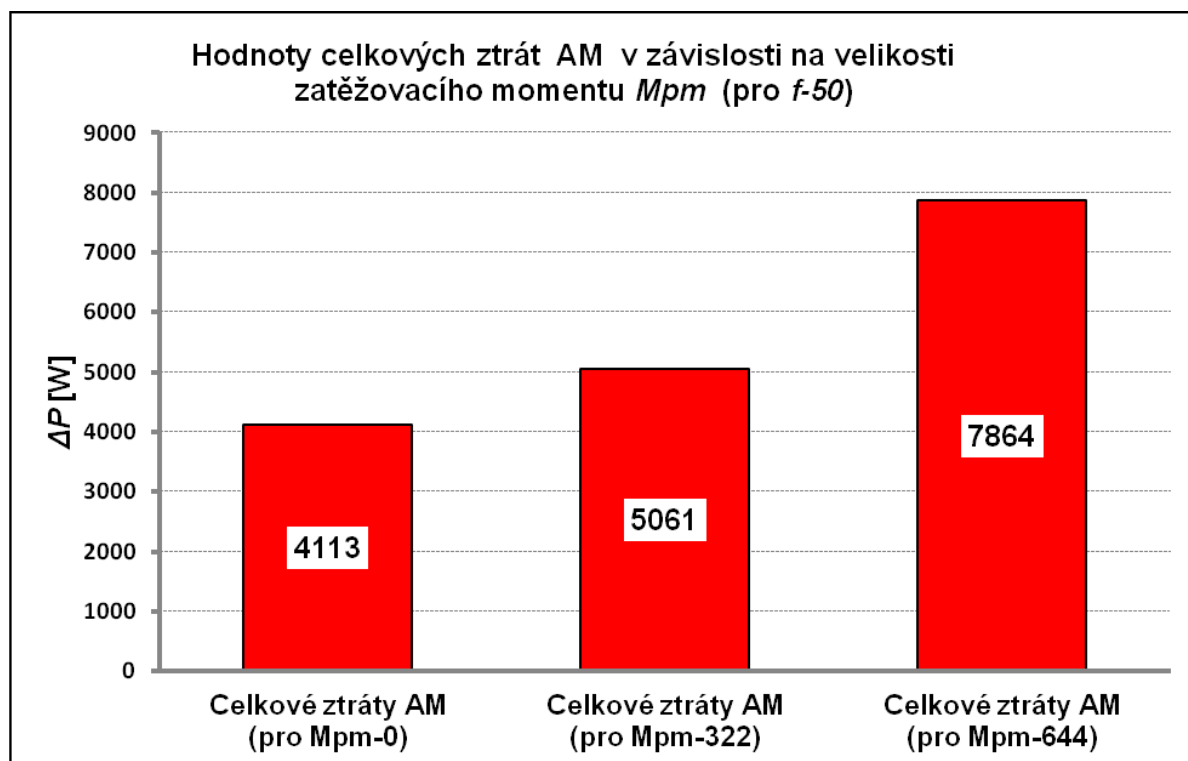


Obr. 45 – Zobrazení rozložení hodnot celkových ztrát AM, NS včetně celkových ztrát v pohonu pro ustálený stav (Mpm-644 a f-50)

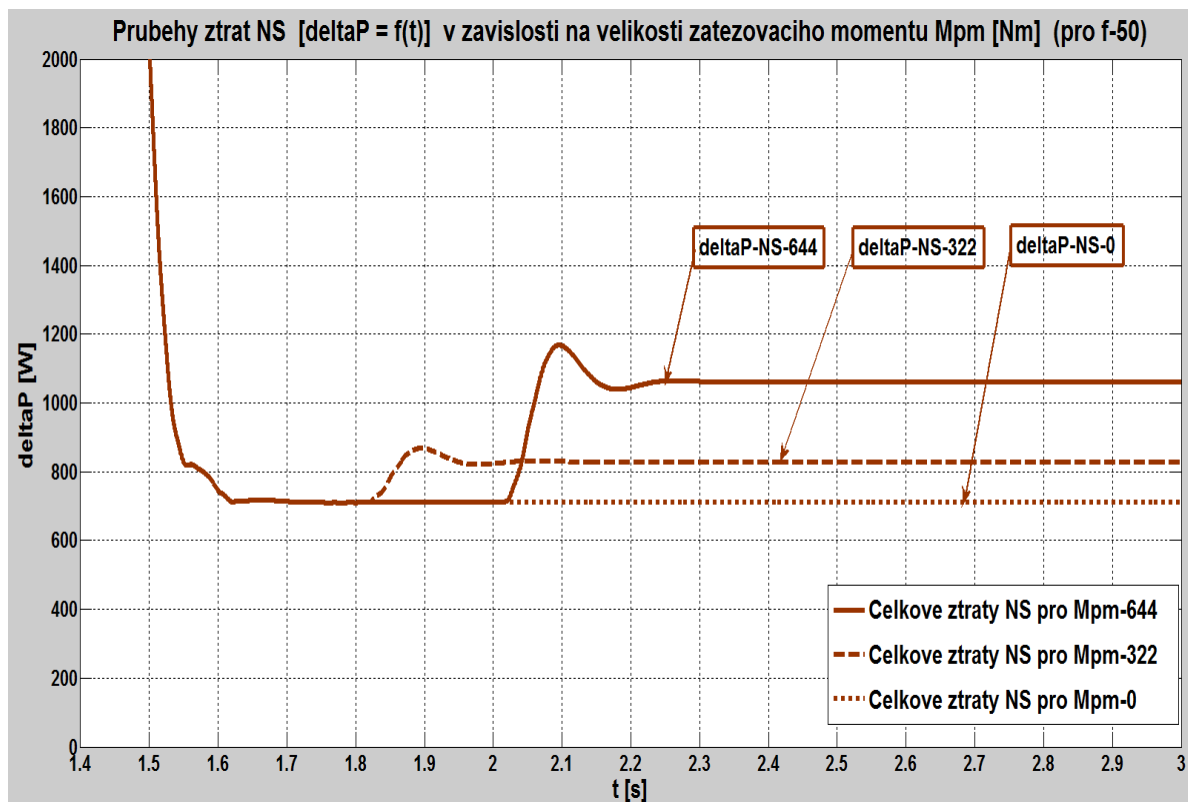
3.7 Průběhy a porovnání celkových ztrát AM, NS a v pohonu v závislosti na velikosti zatěžovacího momentu M_{pm} (M_{pm-0} , M_{pm-322} , M_{pm-644}) pro frekvenci f ($f-50$)



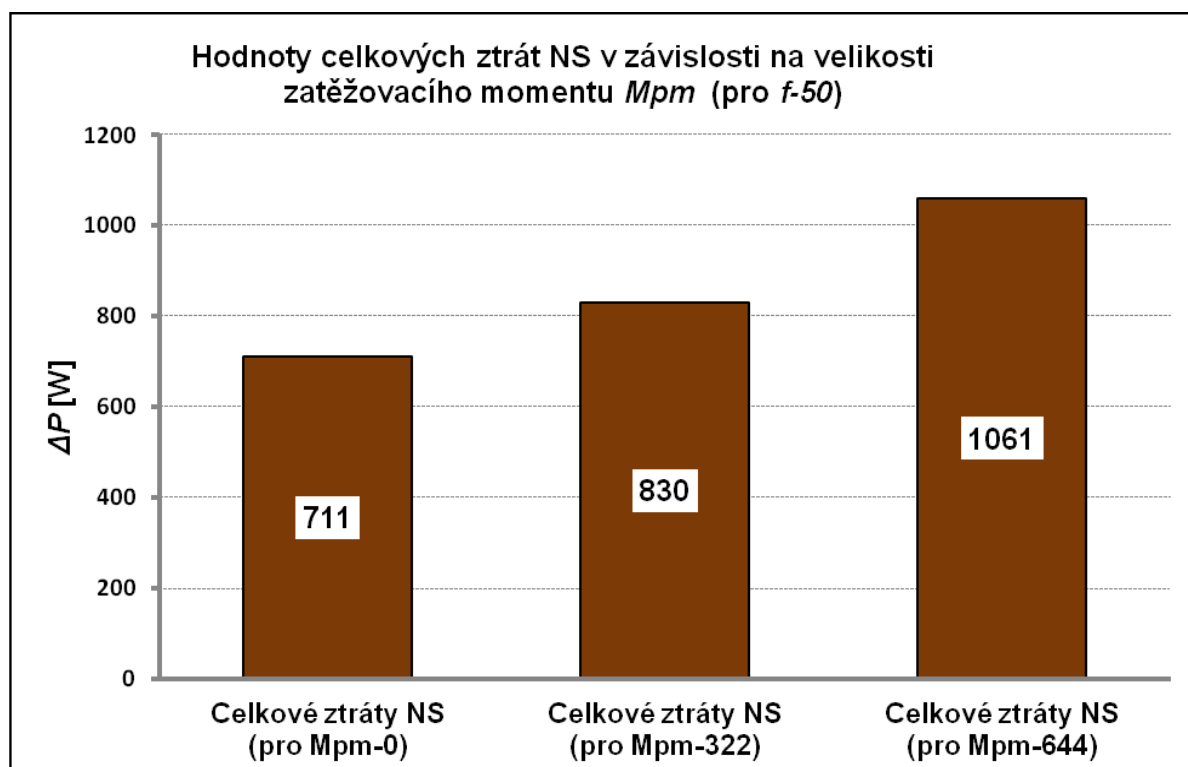
Obr. 46 – Zobrazení průběhů celkových ztrát AM v závislosti na velikosti M_{pm} (pro $f-50$)



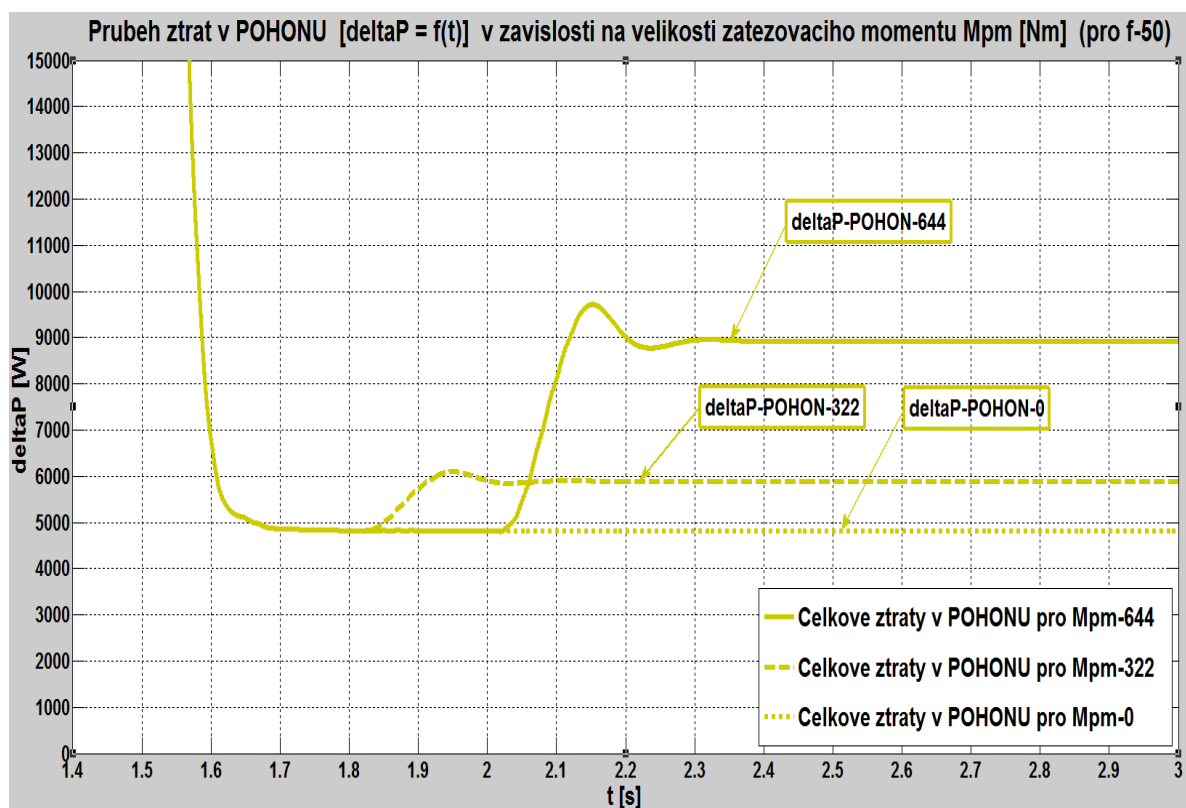
Obr. 47 – Zobrazení rozložení hodnot celkových ztrát AM v závislosti na velikosti M_{pm} (pro $f-50$)



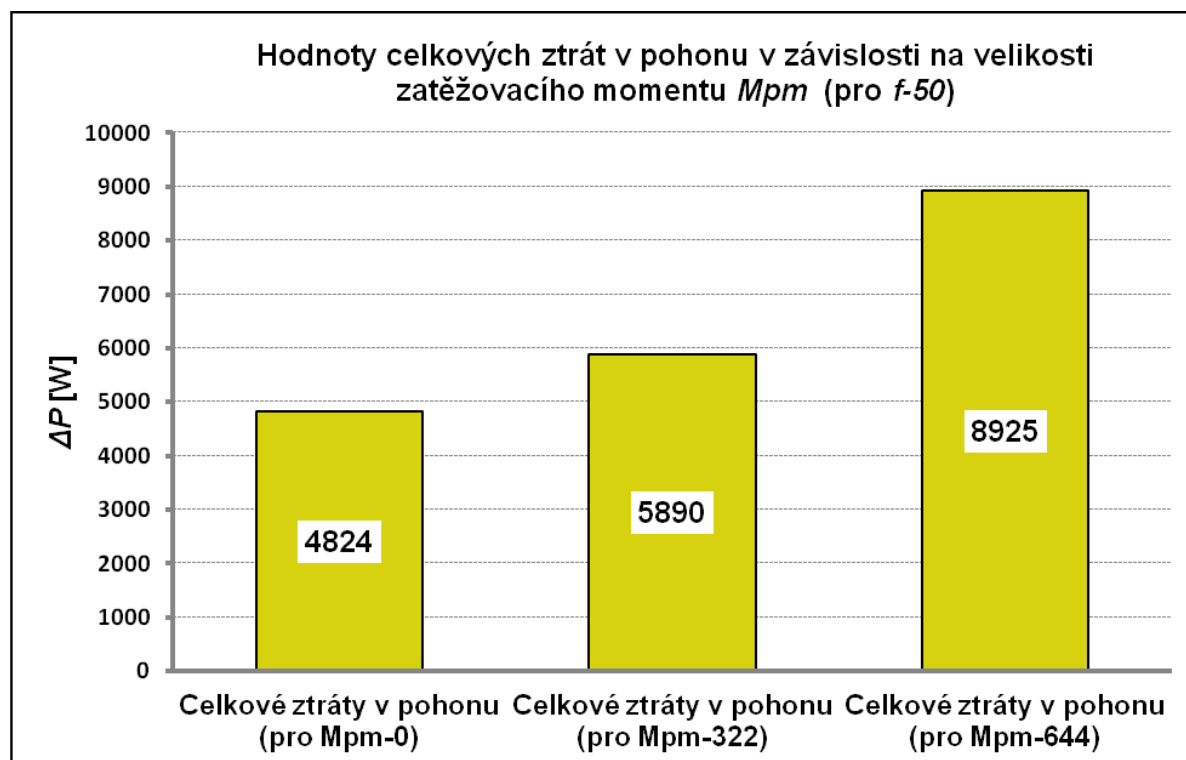
Obr. 48 – Zobrazení průběhů celkových ztrát NS v závislosti na velikosti M_{pm} (pro $f=50$)



Obr. 49 – Zobrazení rozložení hodnot celkových ztrát NS v závislosti na velikosti M_{pm} (pro $f=50$)

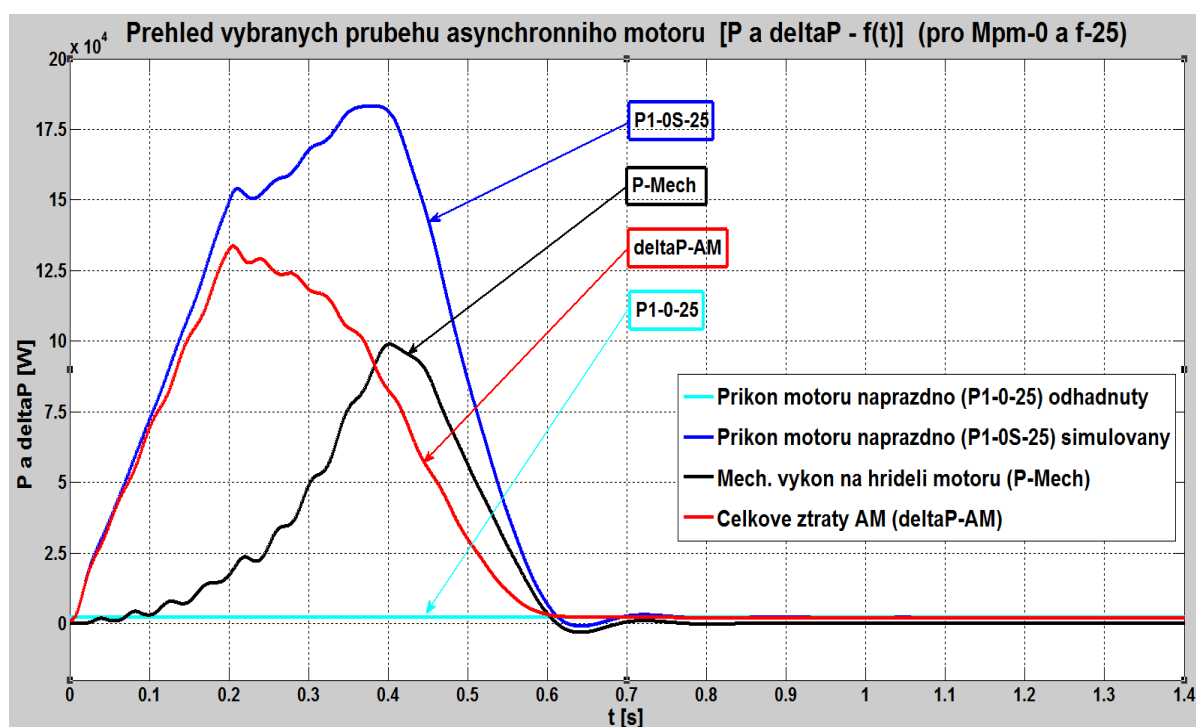


Obr. 50 – Zobrazení průběhů celkových ztrát v pohonu v závislosti na velikosti M_{pm} (pro $f=50$)

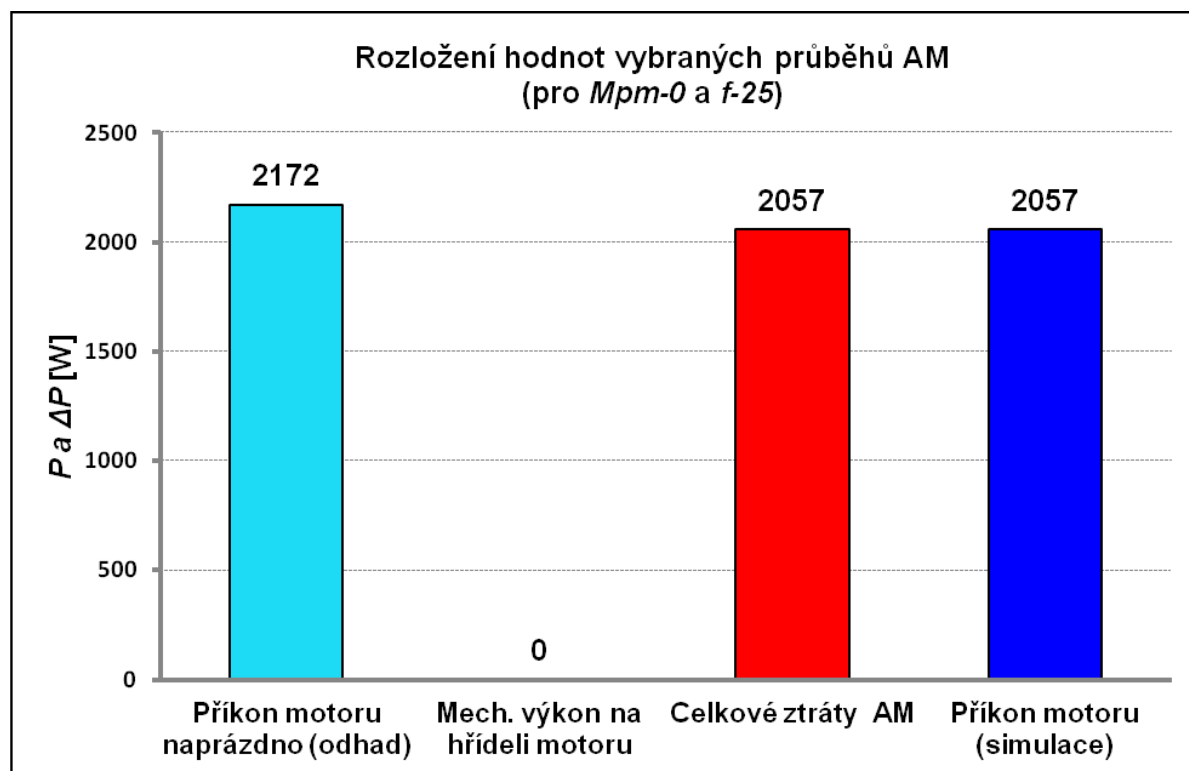


Obr. 51 – Zobrazení rozložení hodnot celkových ztrát v pohonu v závislosti na velikosti M_{pm} (pro $f=50$)

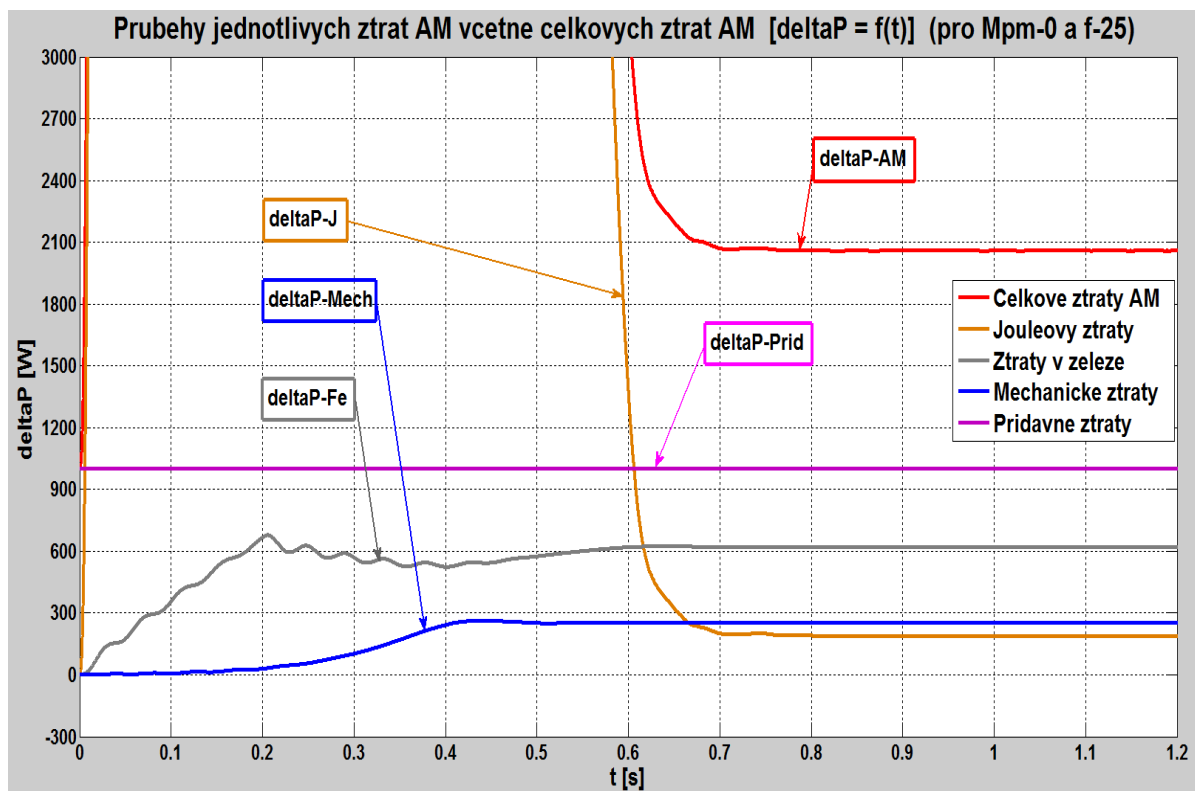
3.8 Jednotlivé průběhy a hodnoty ztrát v rámci daného pohonu (pro *Mpm-0* a *f-25*)



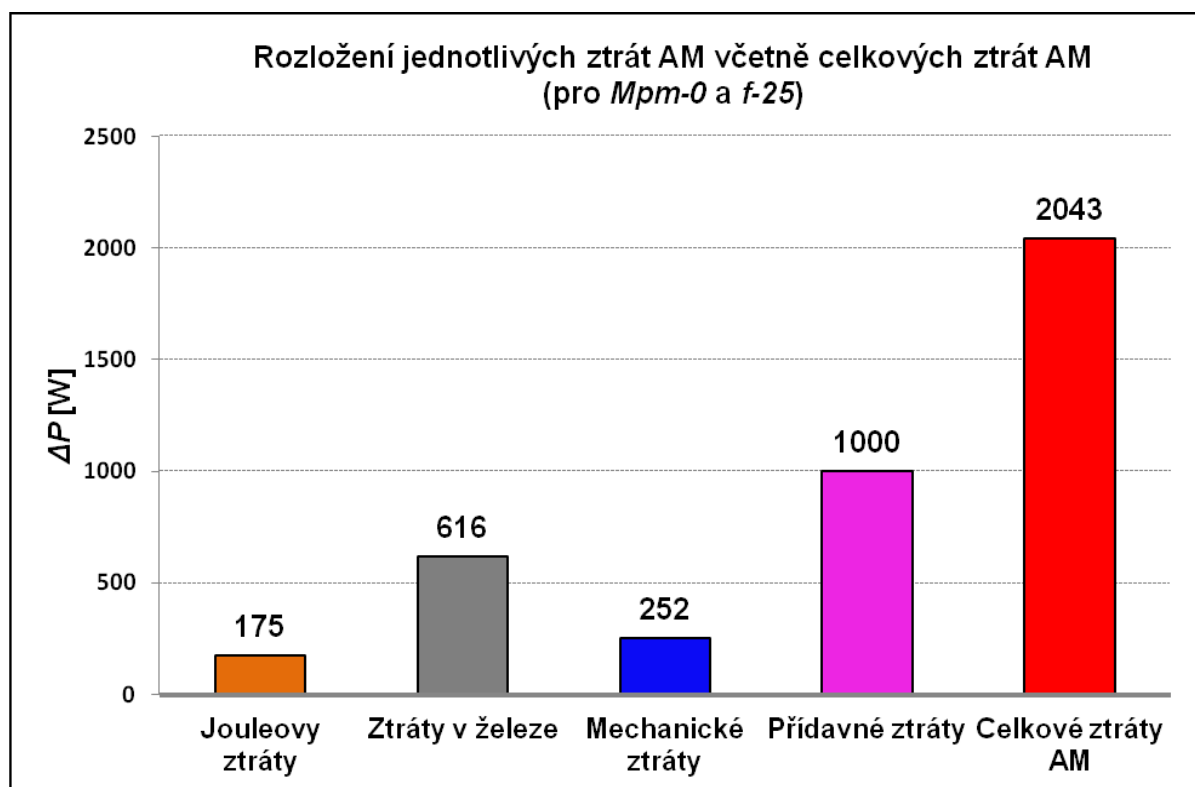
Obr. 52 – Zobrazení přehledu vybraných průběhů asynchronního motoru (*Mpm-0* a *f-25*)



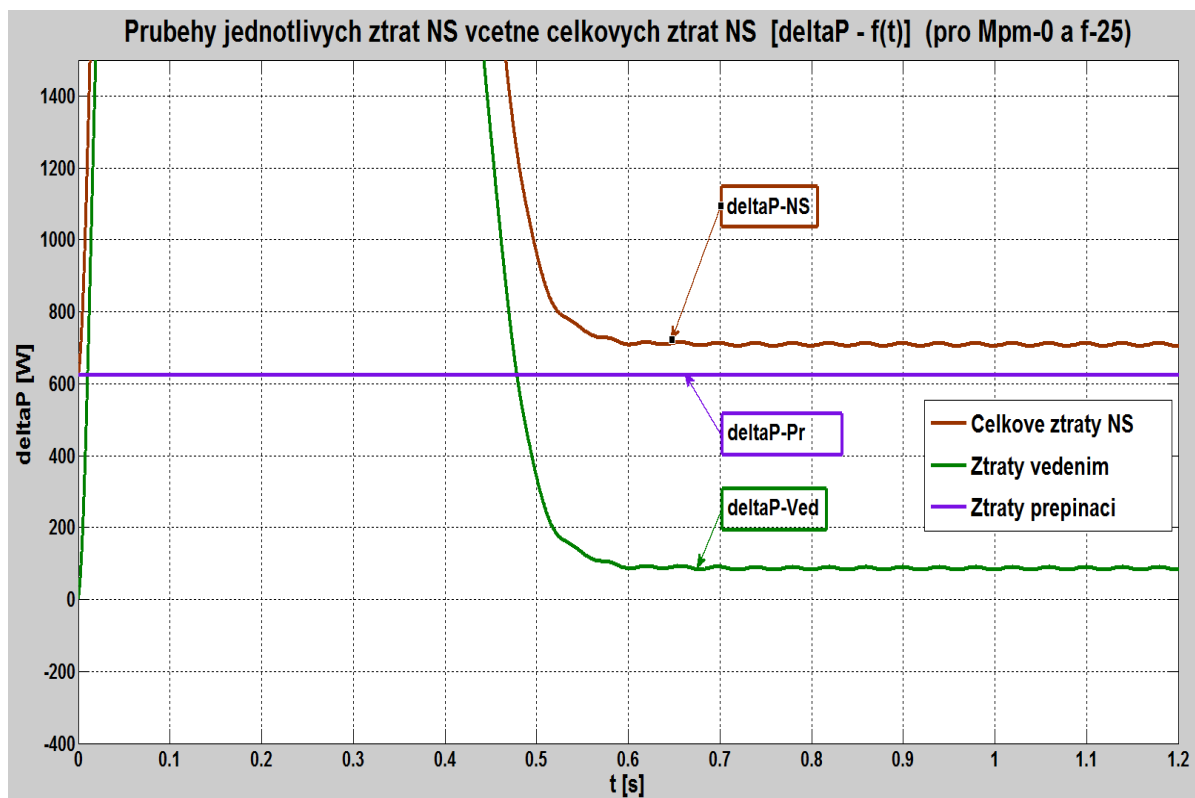
Obr. 53 – Zobrazení rozložení hodnot vybraných průběhů asynchronního motoru pro ustálený stav (*Mpm-0* a *f-25*)



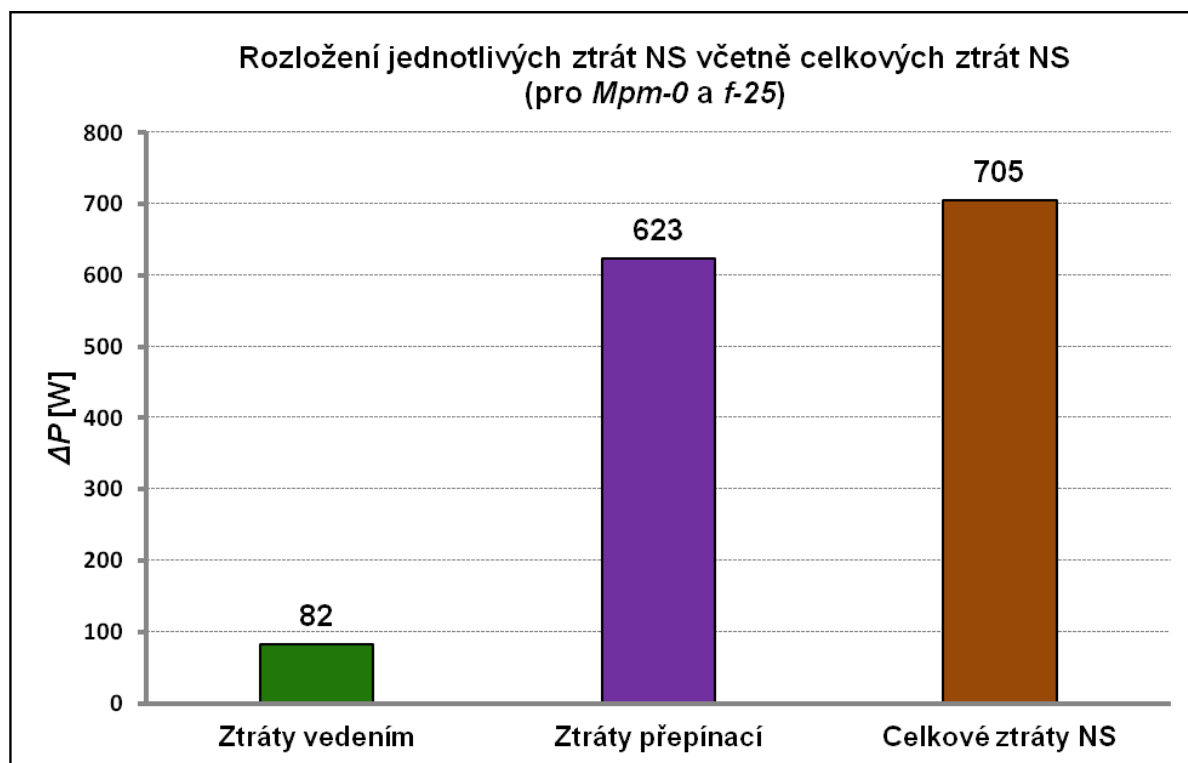
Obr. 54 – Zobrazení průběhů jednotlivých ztrát AM včetně celkových ztrát AM (Mpm-0 a f-25)



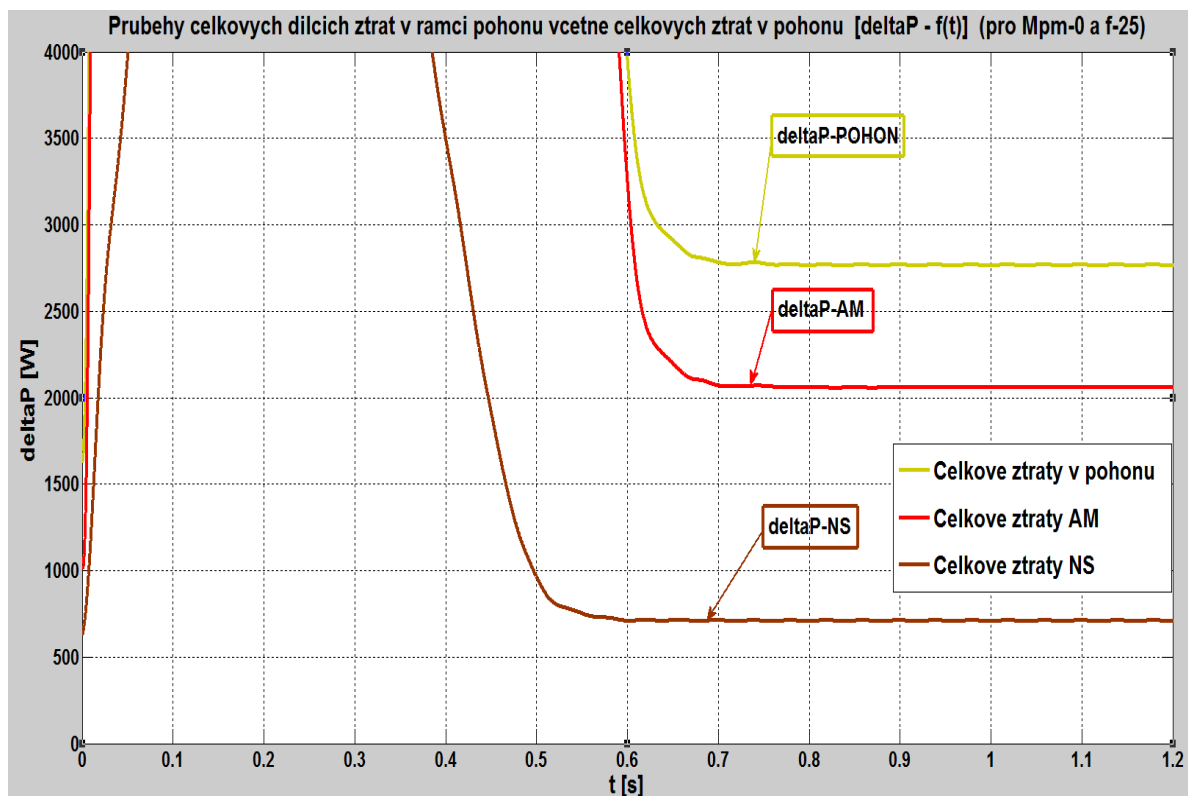
Obr. 55 – Zobrazení rozložení hodnot jednotlivých ztrát AM včetně celkových ztrát AM pro ustálený stav (Mpm-0 a f-25)



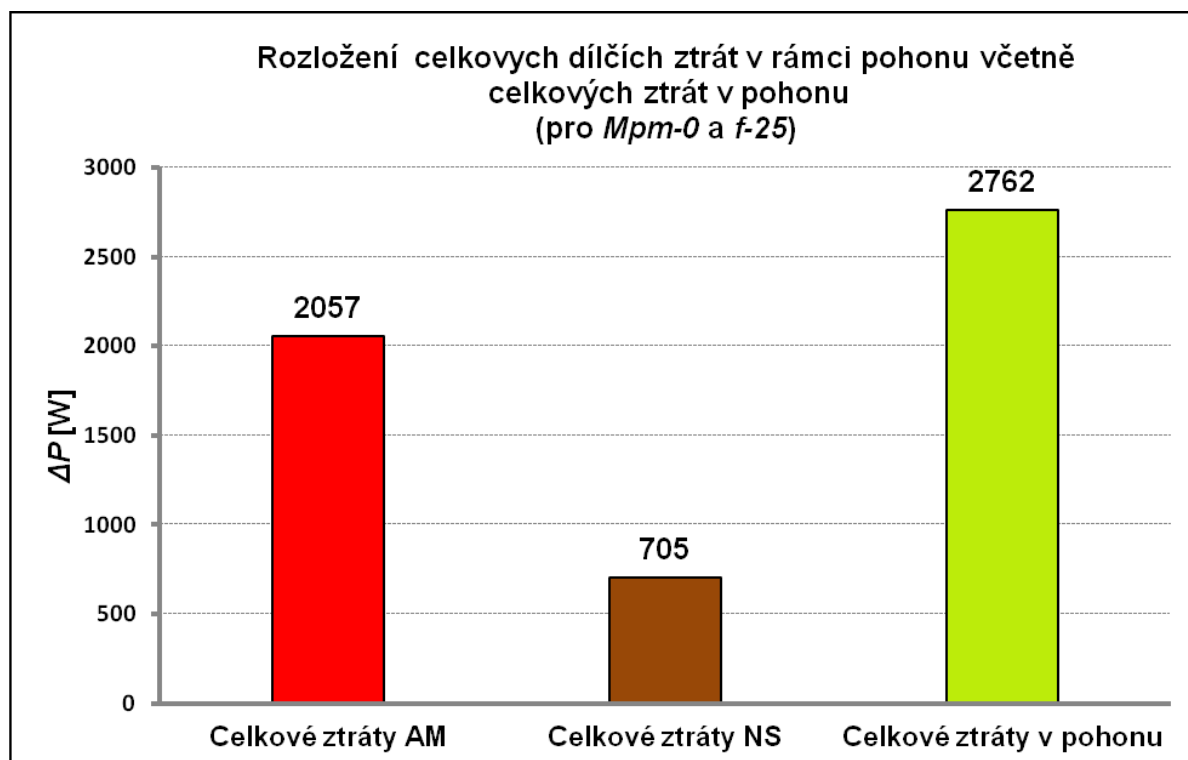
Obr. 56 – Zobrazení přehledu jednotlivých ztrát NS včetně celkových ztrát NS (Mpm-0 a f-25)



Obr. 57 – Zobrazení rozložení hodnot jednotlivých ztrát NS včetně celkových ztrát NS pro ustálený stav (Mpm-0 a f-25)

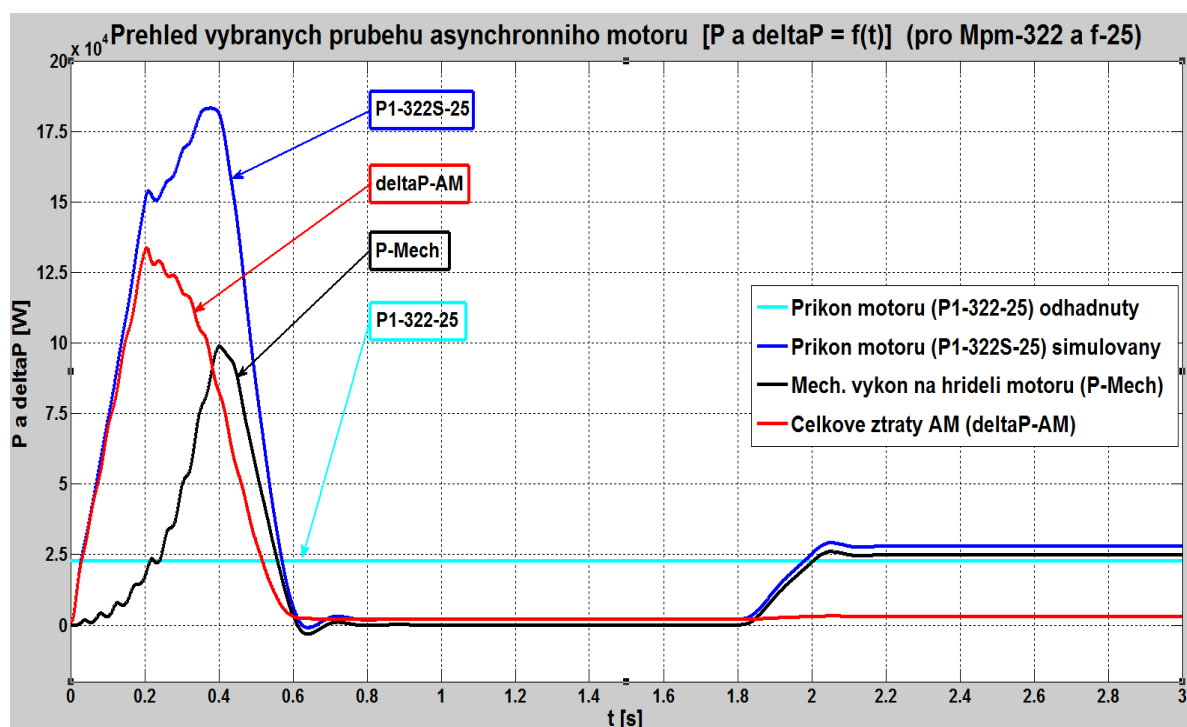


Obr. 58 – Zobrazení průběhů celkových ztrát AM, NS včetně celkových ztrát v pohonu (Mpm-0 a f-25)

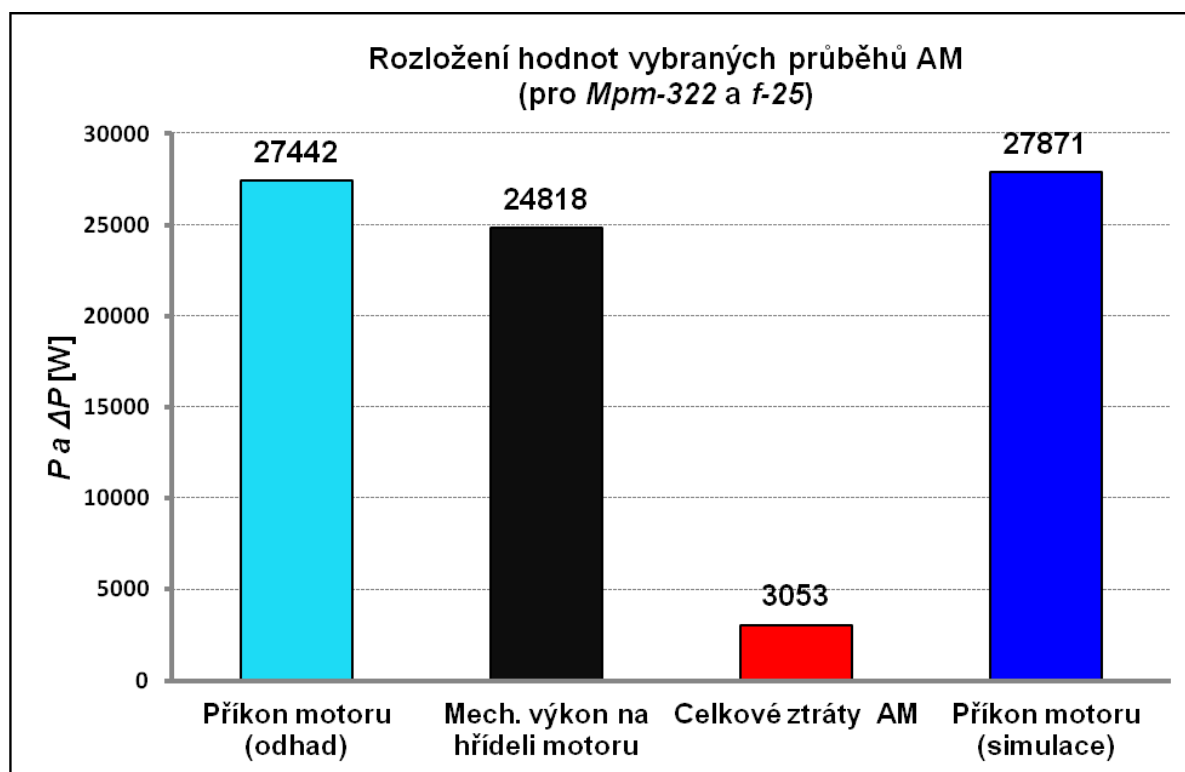


Obr. 59 – Zobrazení rozložení hodnot celkových ztrát AM, NS včetně celkových ztrát v pohonu pro ustálený stav (Mpm-0 a f-25)

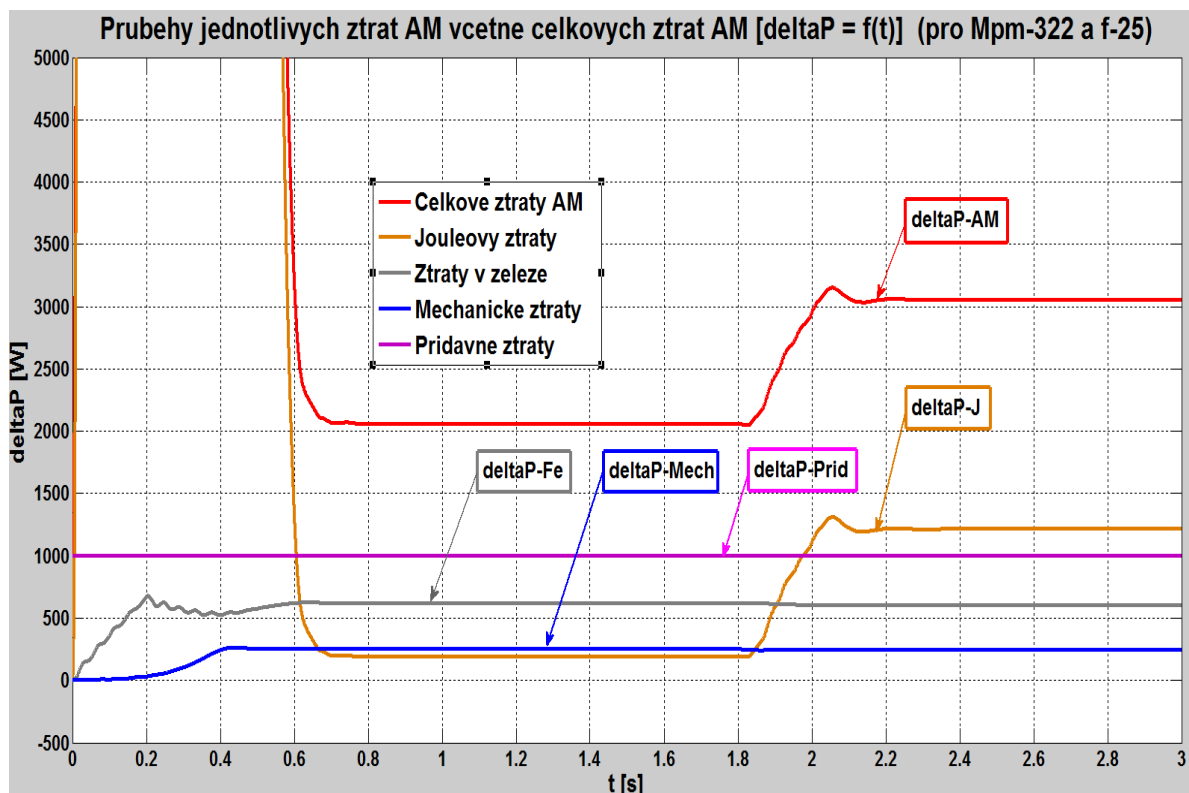
3.9 Jednotlivé průběhy a hodnoty ztrát v rámci daného pohonu (pro *Mpm-322* a *f-25*)



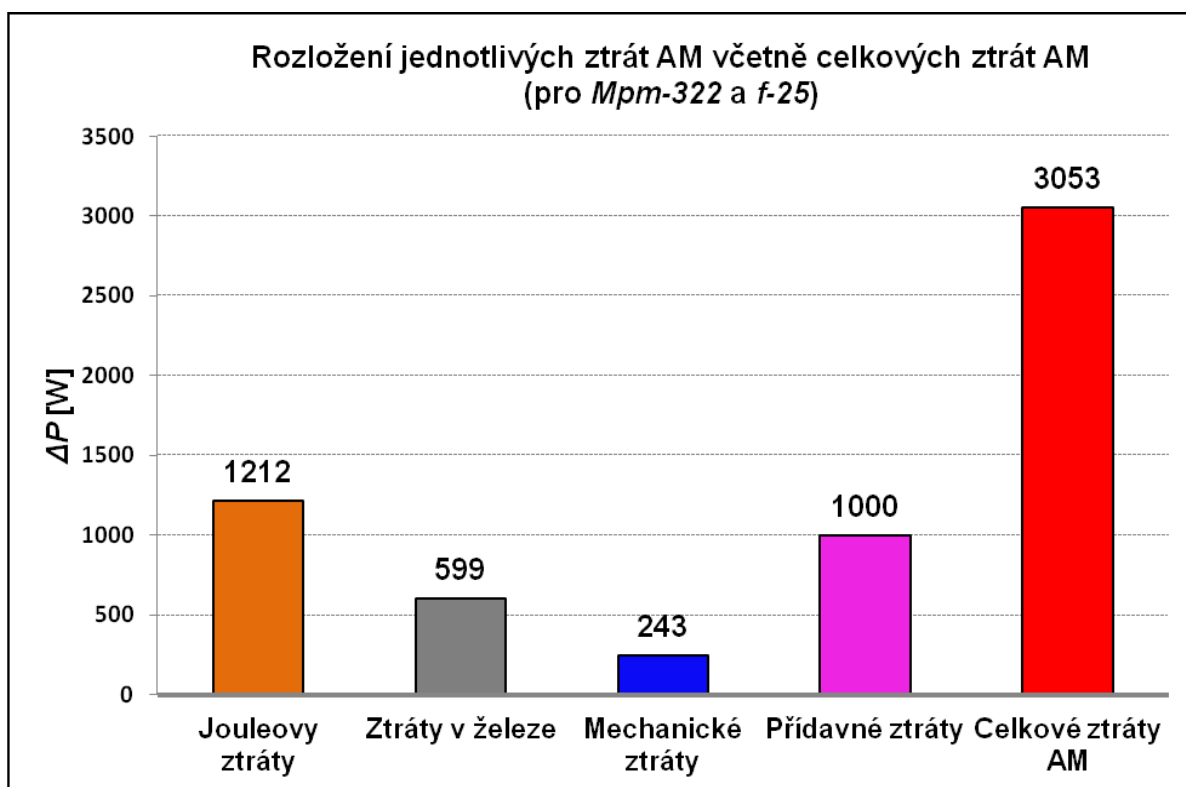
Obr. 60 – Zobrazení přehledu vybraných průběhů asynchronního motoru (*Mpm-322* a *f-25*)



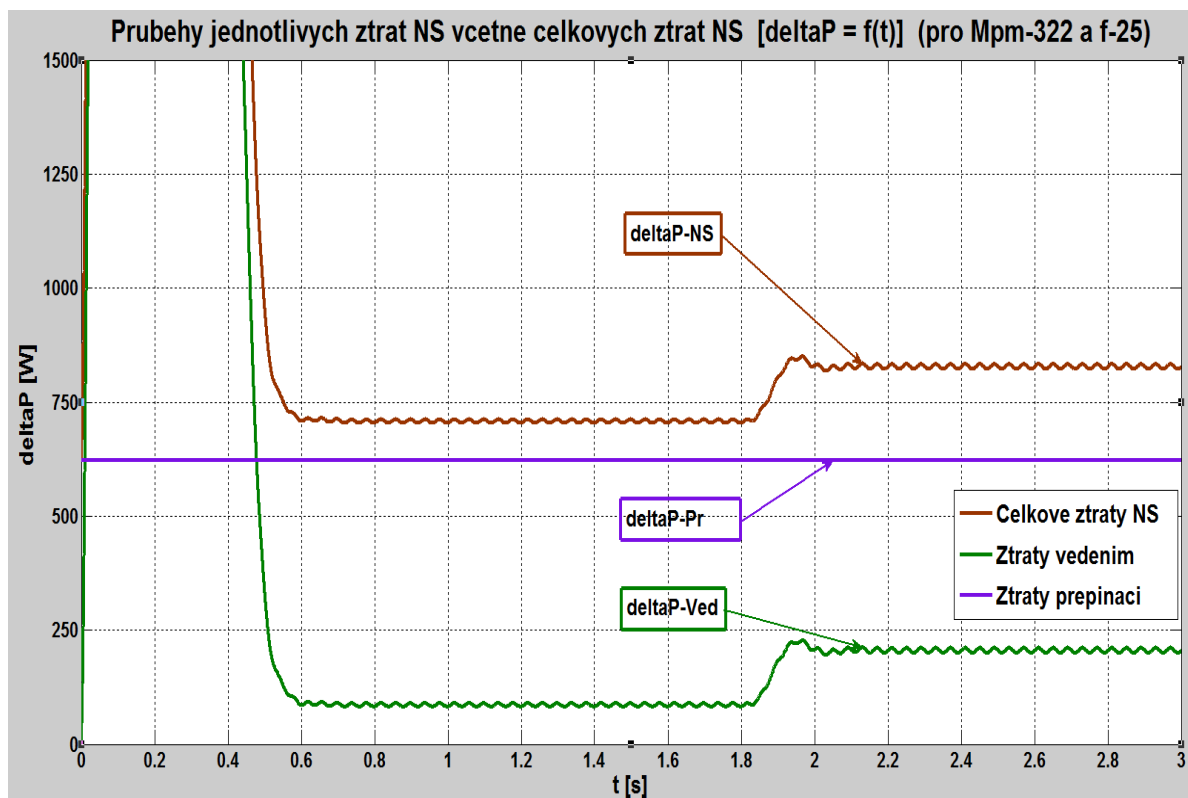
Obr. 61 – Zobrazení rozložení hodnot vybraných průběhů asynchronního motoru pro ustálený stav (*Mpm-322* a *f-25*)



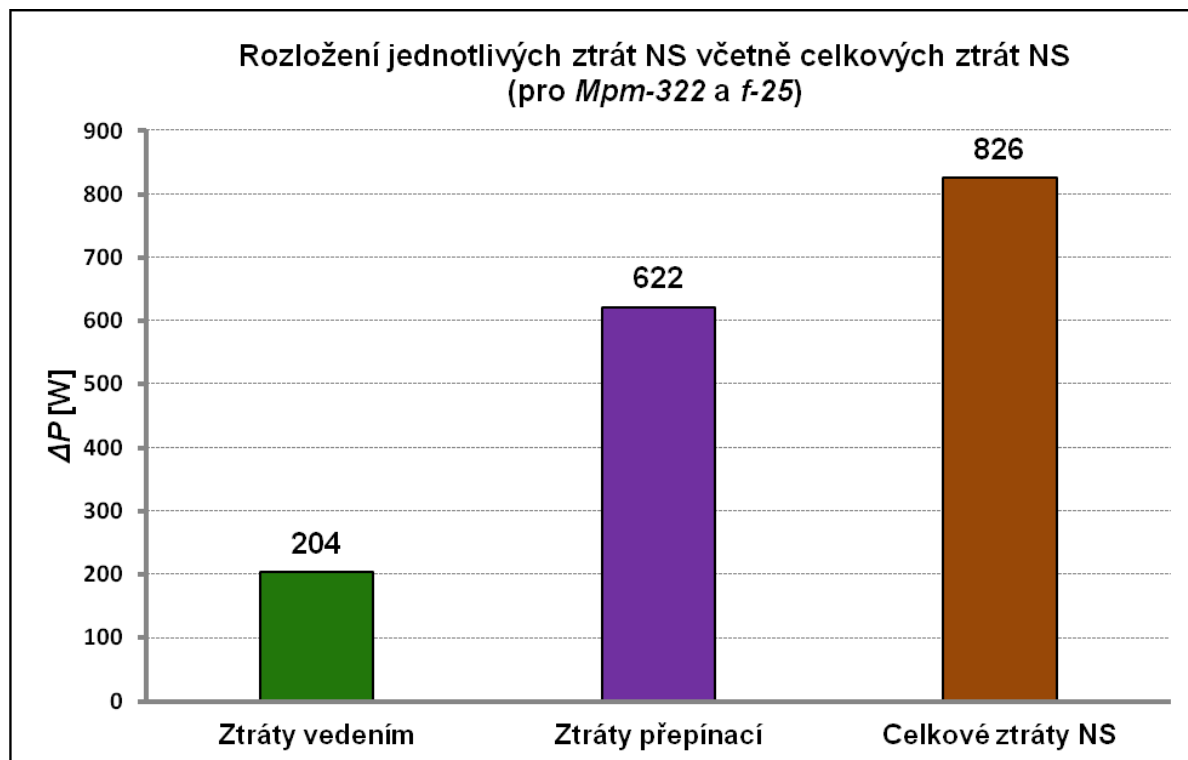
Obr. 62 – Zobrazení průběhů jednotlivých ztrát AM včetně celkových ztrát AM (Mpm-322 a f-25)



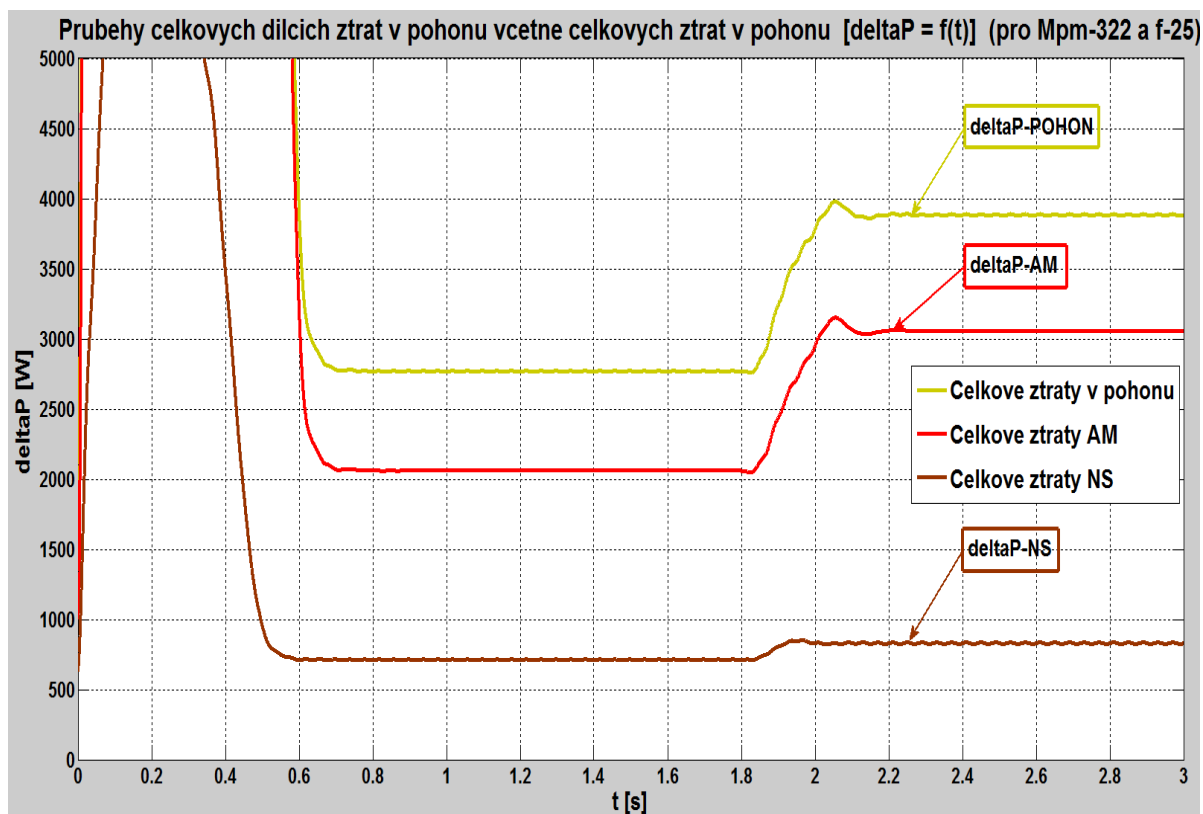
Obr. 63 – Zobrazení rozložení hodnot jednotlivých ztrát AM včetně celkových ztrát AM pro ustálený stav (Mpm-322 a f-25)



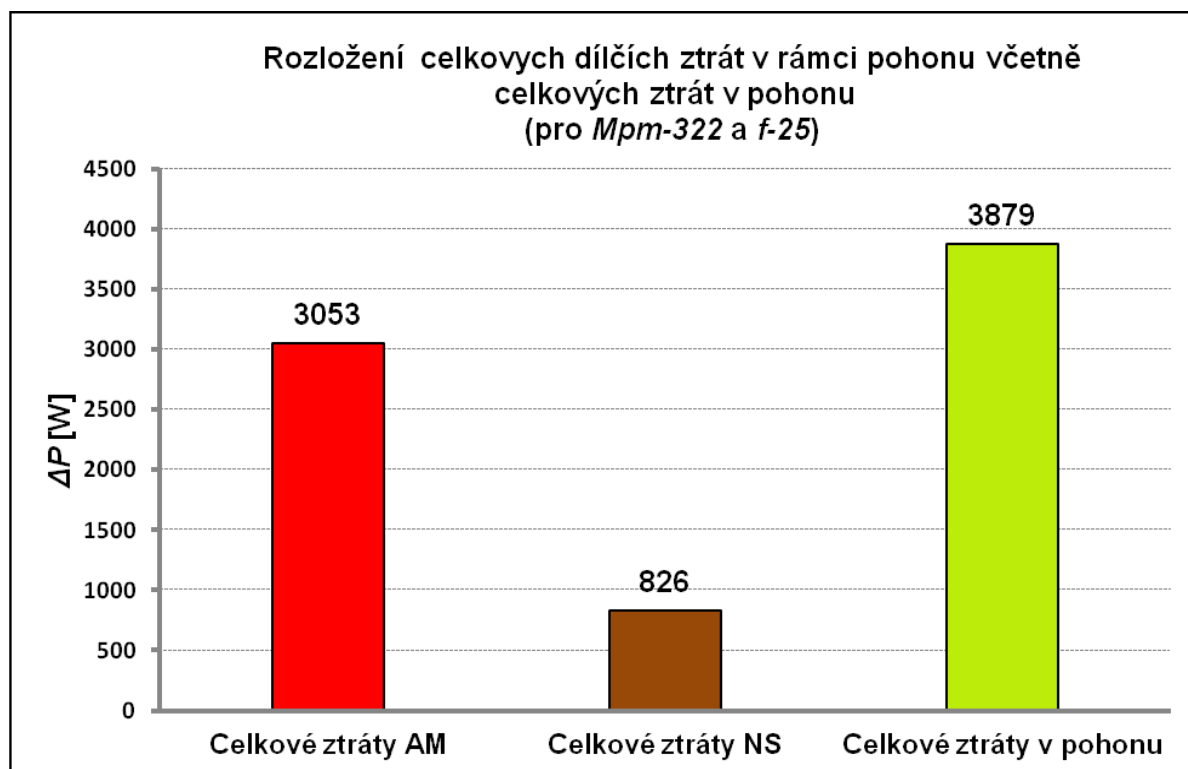
Obr. 64 – Zobrazení přehledu jednotlivých ztrát NS včetně celkových ztrát NS (Mpm-322 a f-25)



Obr. 65 – Zobrazení rozložení hodnot jednotlivých ztrát NS včetně celkových ztrát NS pro ustálený stav (Mpm-322 a f-25)

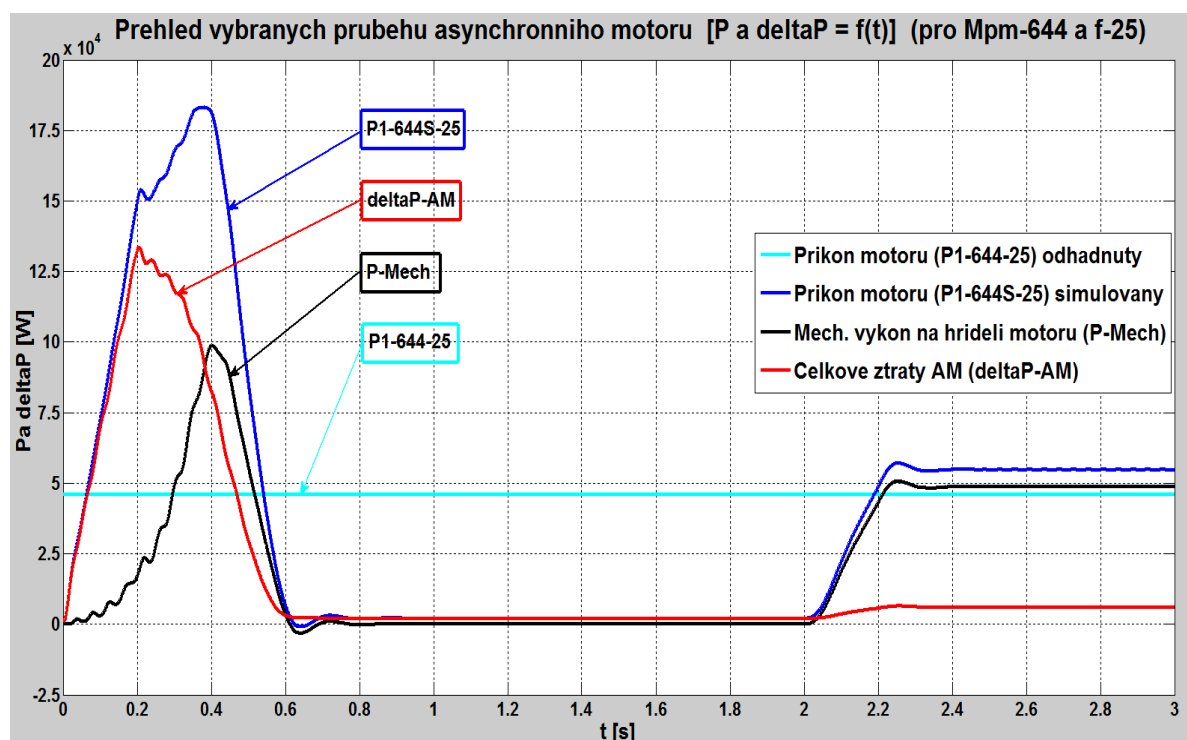


Obr. 66 – Zobrazení průběhů celkových ztrát AM, NS včetně celkových ztrát v pohonu (Mpm-322 a f-25)

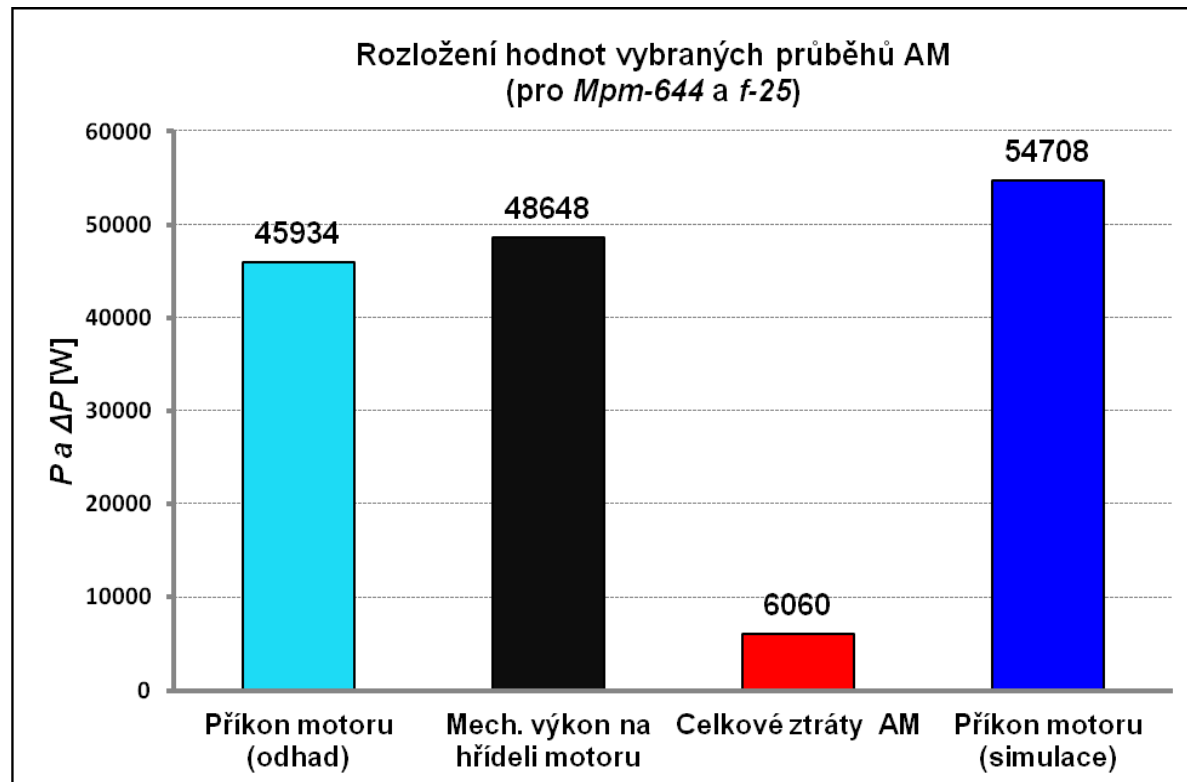


Obr. 67 – Zobrazení rozložení hodnot celkových ztrát AM, NS včetně celkových ztrát v pohonu pro ustálený stav (Mpm-322 a f-25)

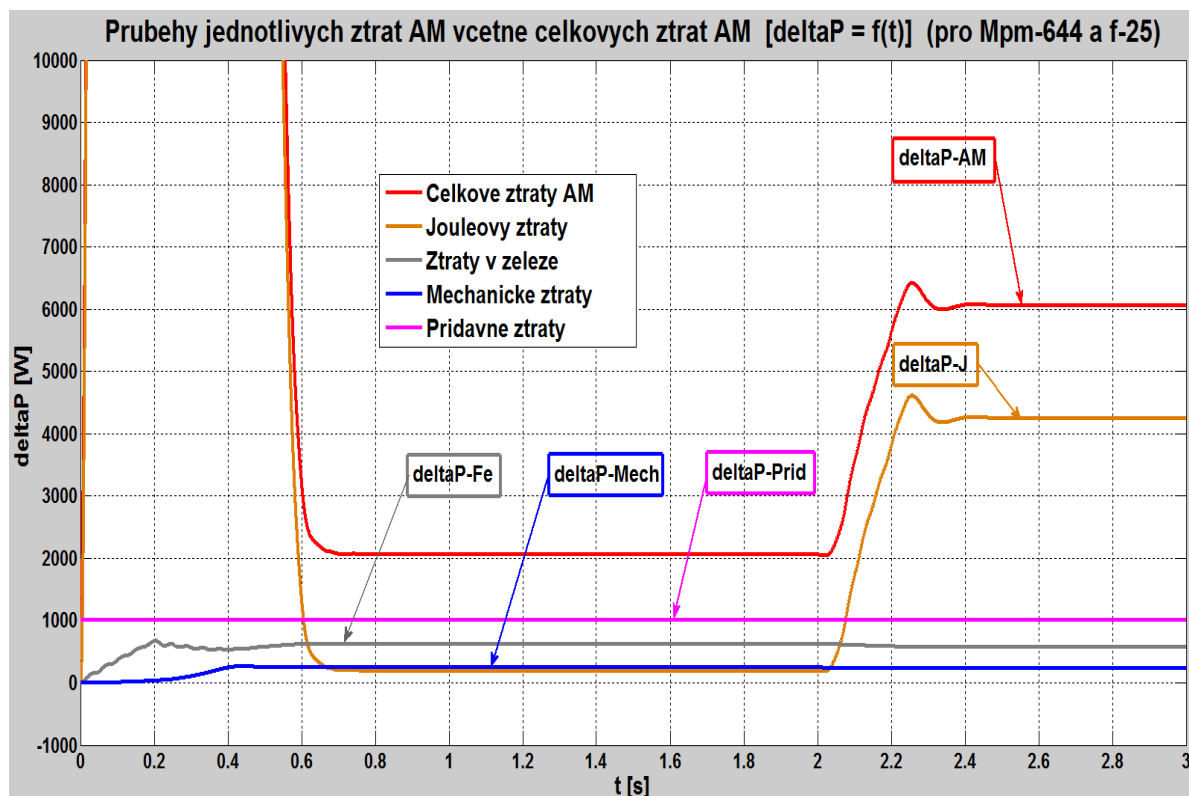
3.10 Jednotlivé průběhy a hodnoty ztrát v rámci daného pohonu (pro *Mpm-644* a *f-25*)



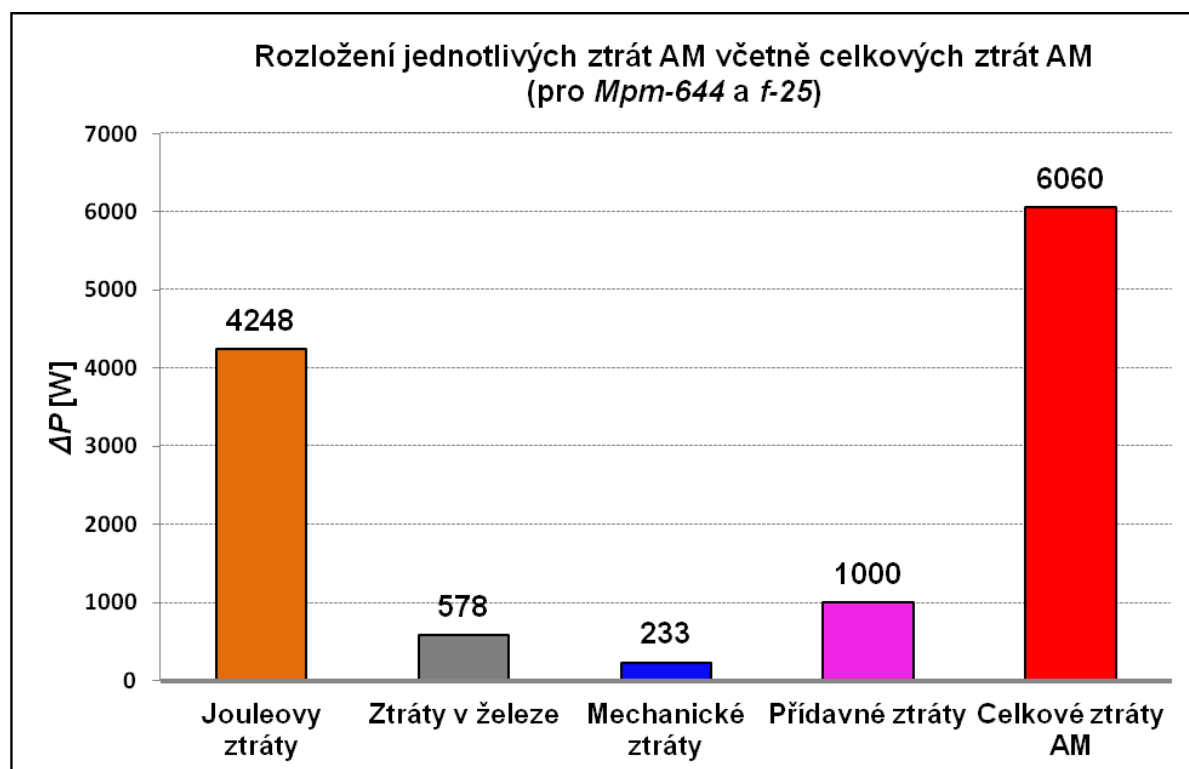
Obr. 68 – Zobrazení přehledu vybraných průběhů asynchronního motoru (*Mpm-644* a *f-25*)



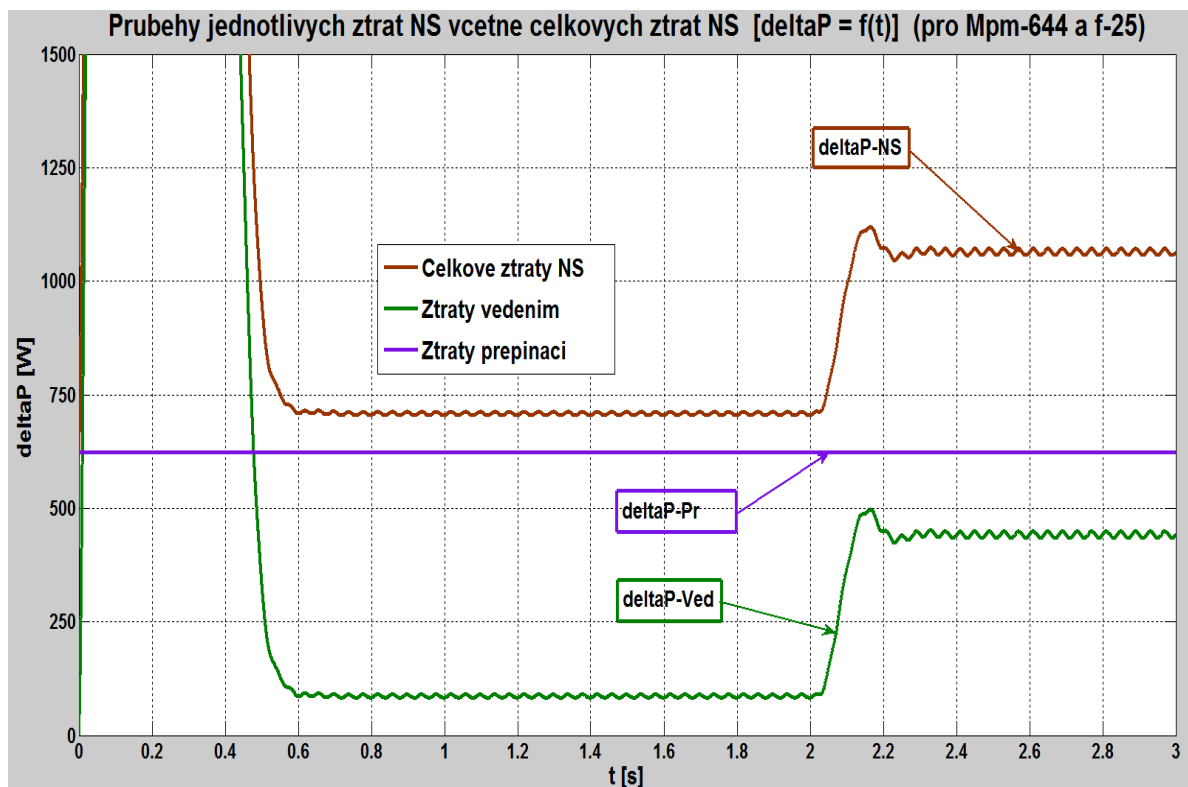
Obr. 69 – Zobrazení rozložení hodnot vybraných průběhů asynchronního motoru pro ustálený stav (*Mpm-644* a *f-25*)



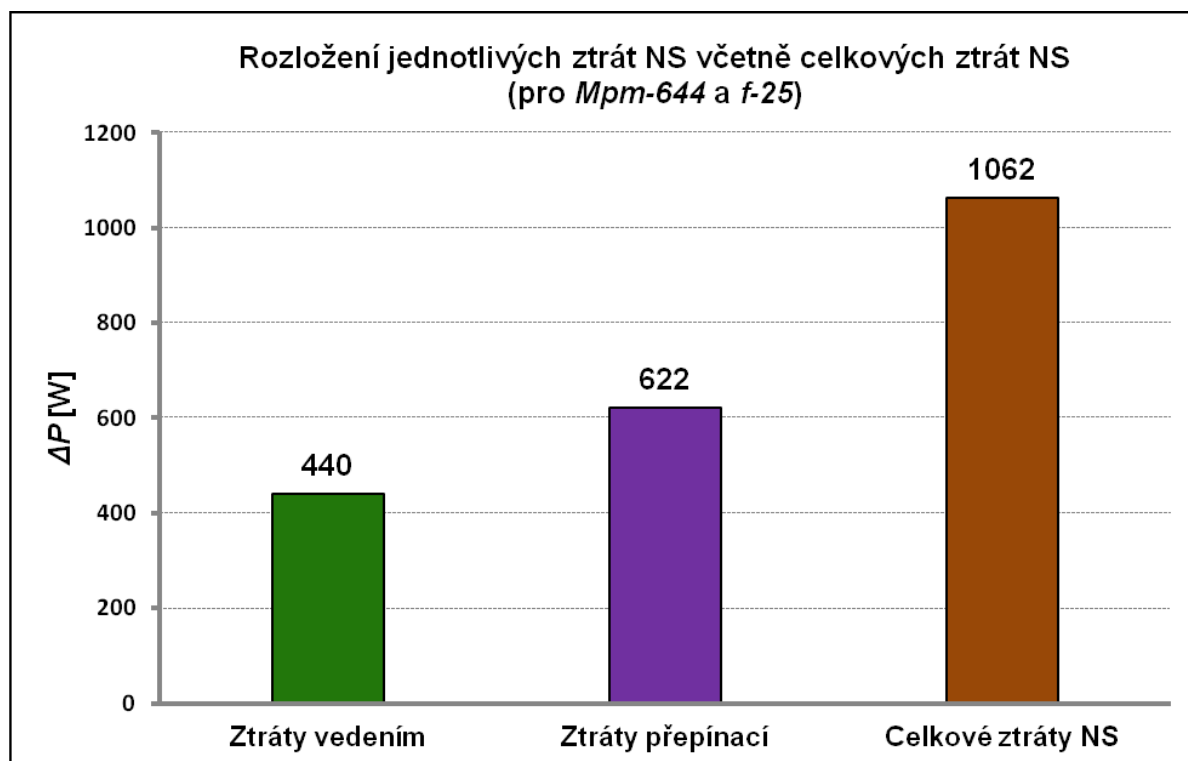
Obr. 70 – Zobrazení průběhů jednotlivých ztrát AM včetně celkových ztrát AM (Mpm-644 a f-25)



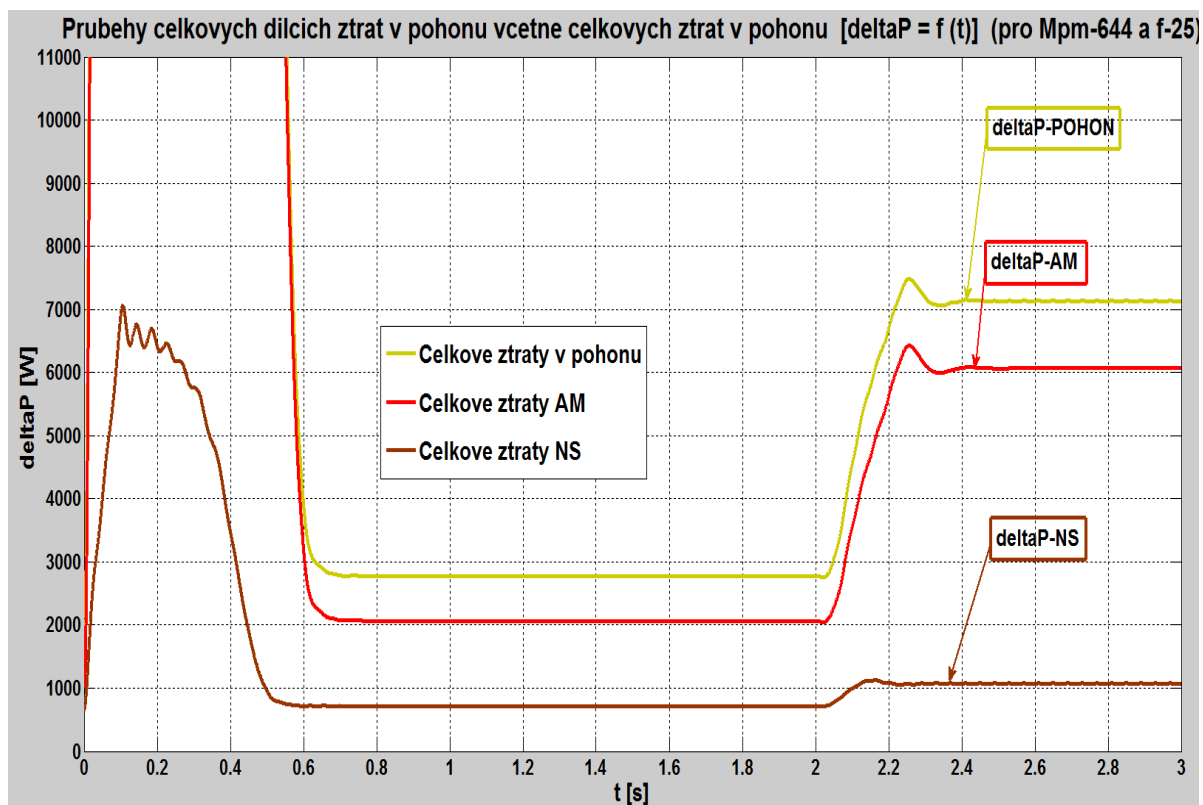
Obr. 71 – Zobrazení rozložení hodnot jednotlivých ztrát AM včetně celkových ztrát AM pro ustálený stav (Mpm-644 a f-25)



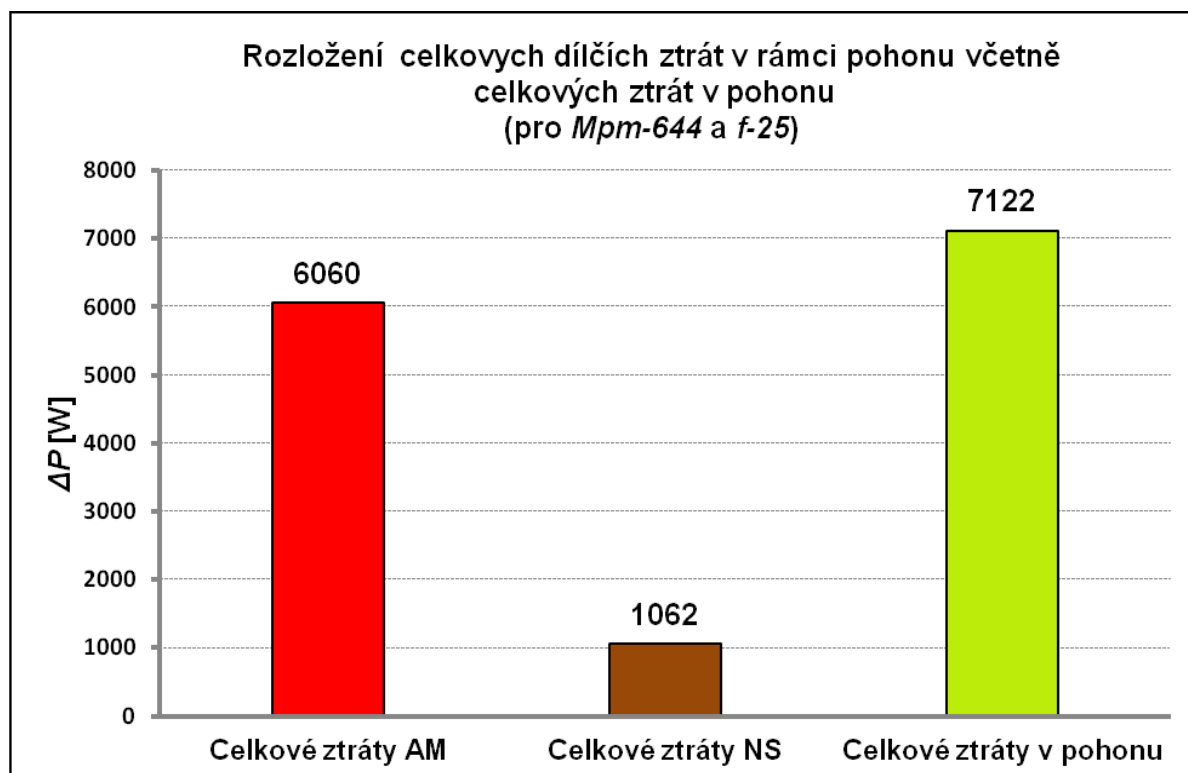
Obr. 72 – Zobrazení přehledu jednotlivých ztrát NS včetně celkových ztrát NS (Mpm-644 a f-25)



Obr. 73 – Zobrazení rozložení hodnot jednotlivých ztrát NS včetně celkových ztrát NS pro ustálený stav (Mpm-644 a f-25)

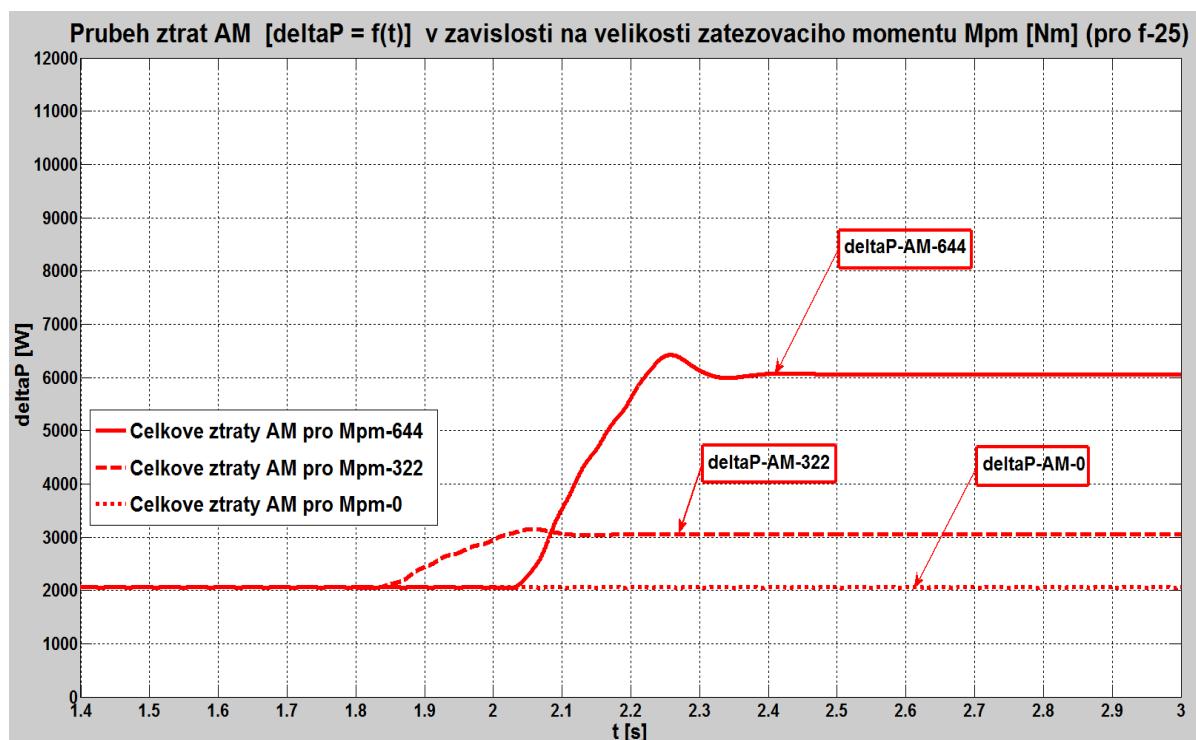


Obr. 74 – Zobrazení průběhů celkových ztrát AM, NS včetně celkových ztrát v pohonu (Mpm-644 a f-25)

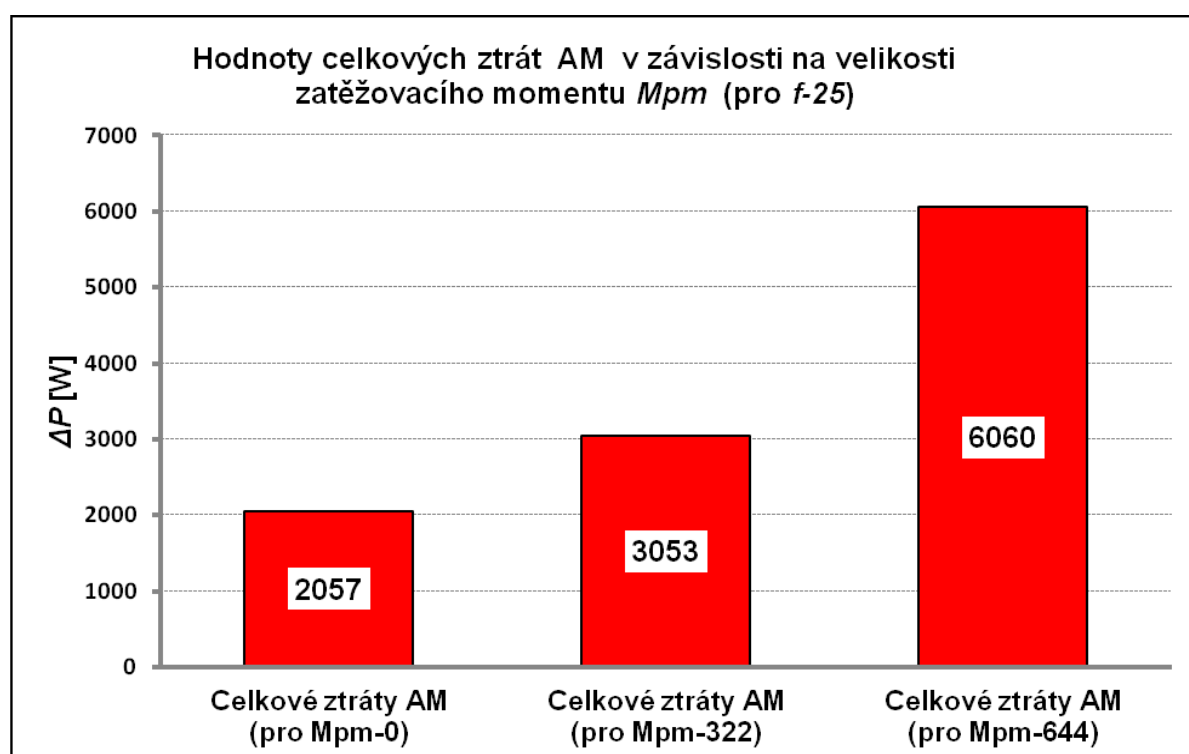


Obr. 75 – Zobrazení rozložení hodnot celkových ztrát AM, NS včetně celkových ztrát v pohonu pro ustálený stav (Mpm-644 a f-25)

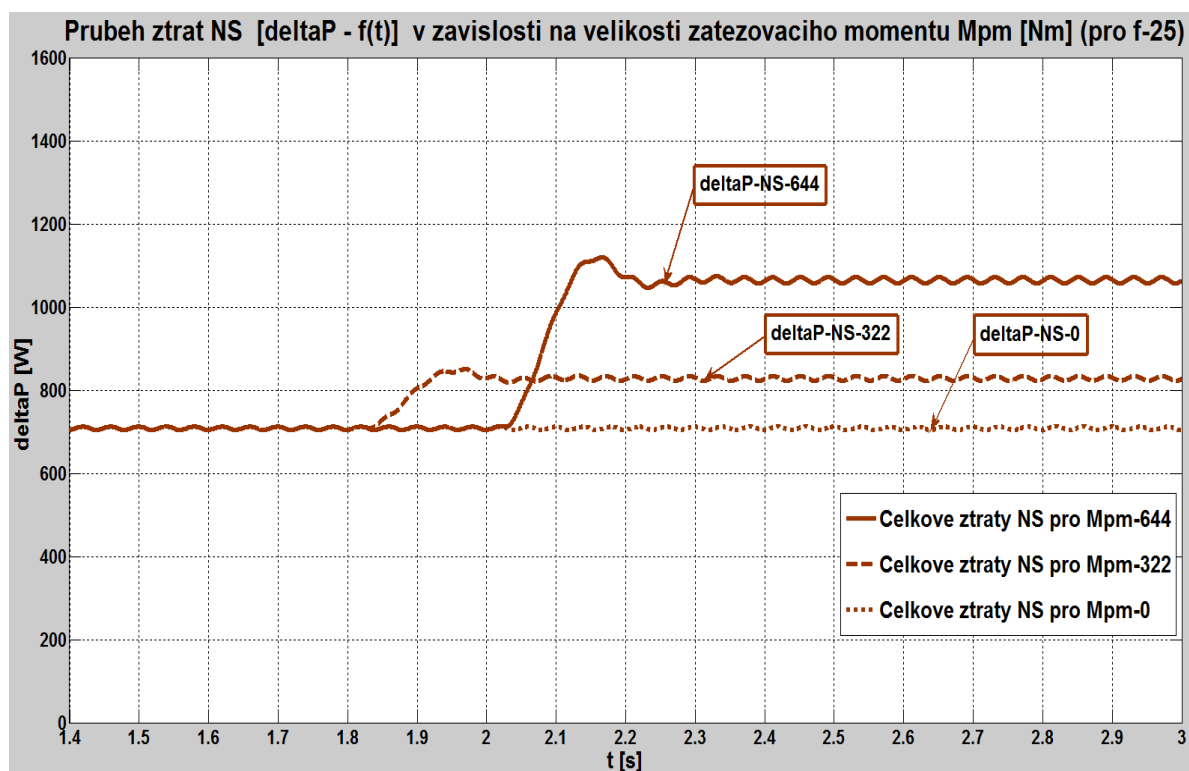
3.11 Průběhy a porovnání celkových ztrát AM, NS a v pohonu v závislosti na velikosti zatěžovacího momentu M_{pm} (M_{pm-0} , M_{pm-322} , M_{pm-644}) pro frekvenci f ($f-25$)



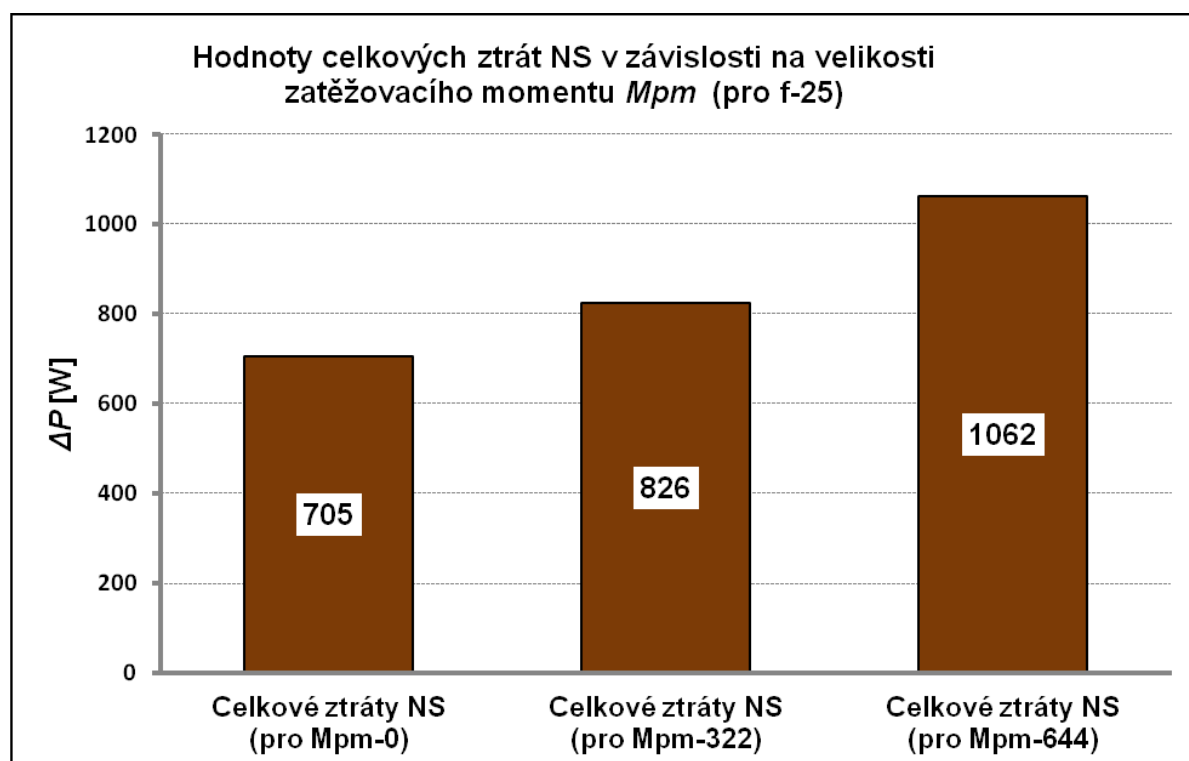
Obr. 76 – Zobrazení průběhů celkových ztrát AM v závislosti na velikosti zvolených hodnot M_{pm} (pro $f-25$)



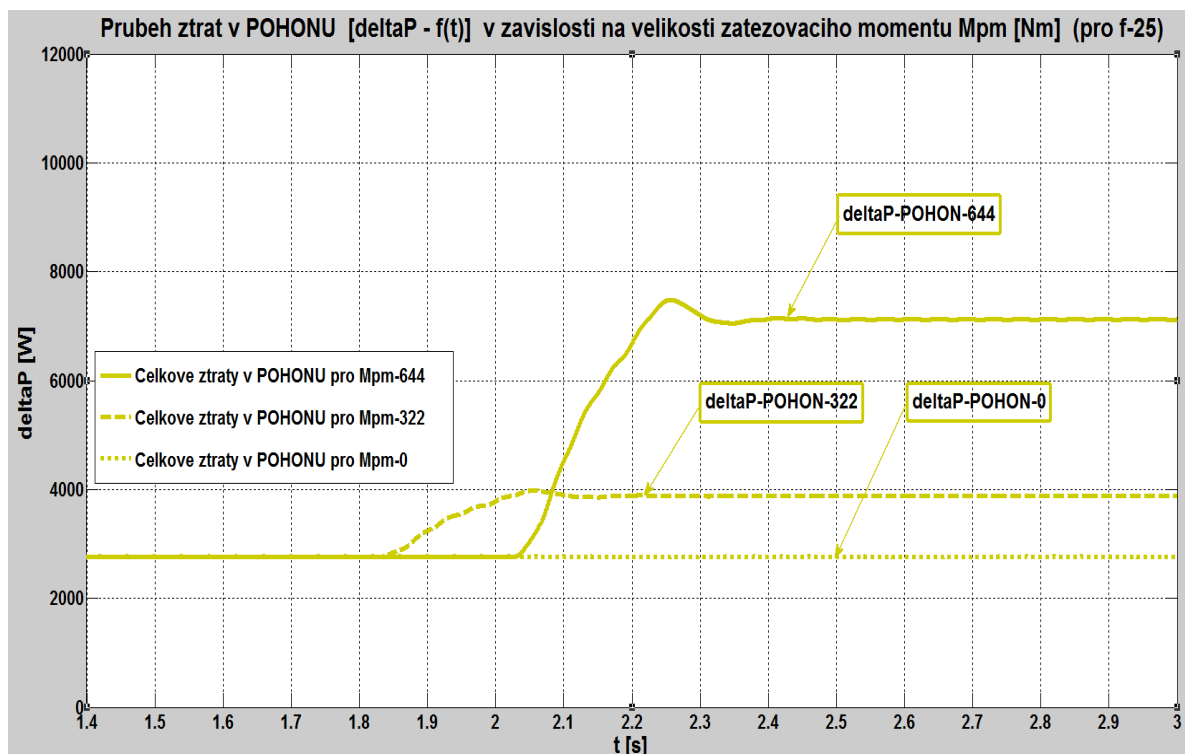
Obr. 77 – Zobrazení rozložení hodnot celkových ztrát AM v závislosti na velikosti zvolených hodnot M_{pm} (pro $f-25$)



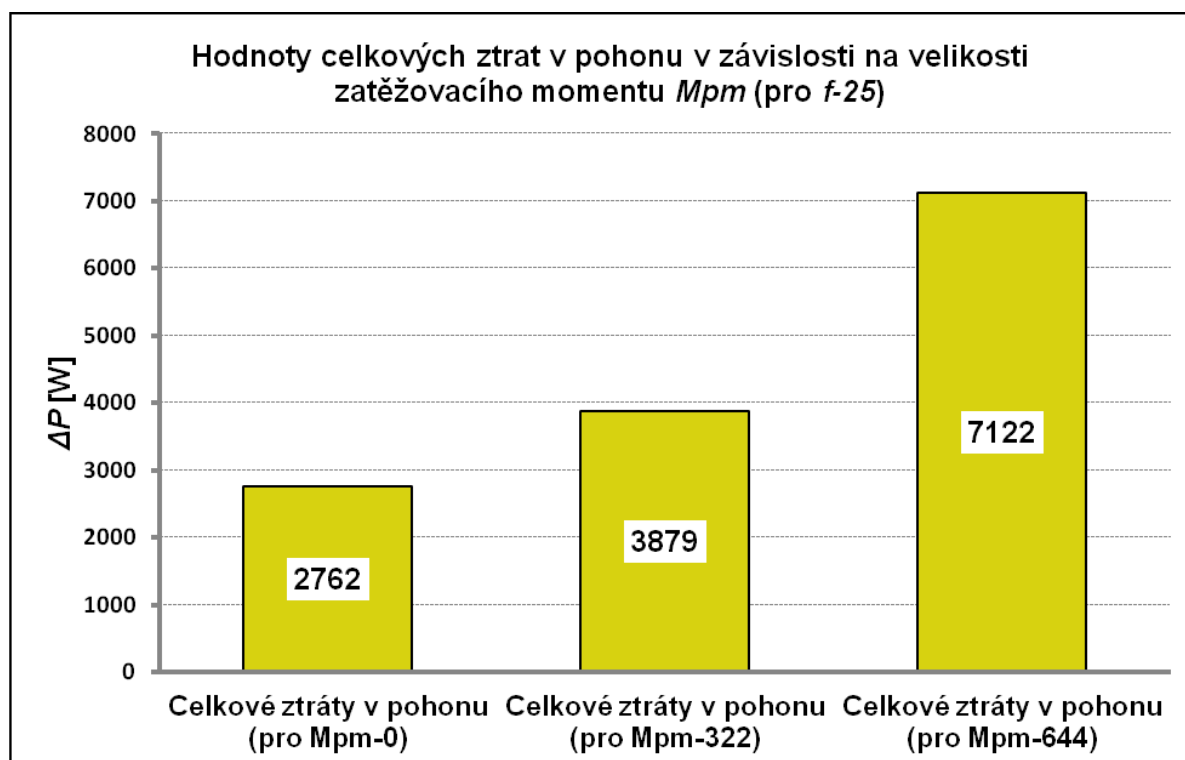
Obr. 78 – Zobrazení průběhů celkových ztrát NS v závislosti na velikosti zvolených hodnot M_{pm} (pro $f=25$)



Obr. 79 – Zobrazení rozložení hodnot celkových ztrát NS v závislosti na velikosti zvolených hodnot M_{pm} (pro $f=25$)

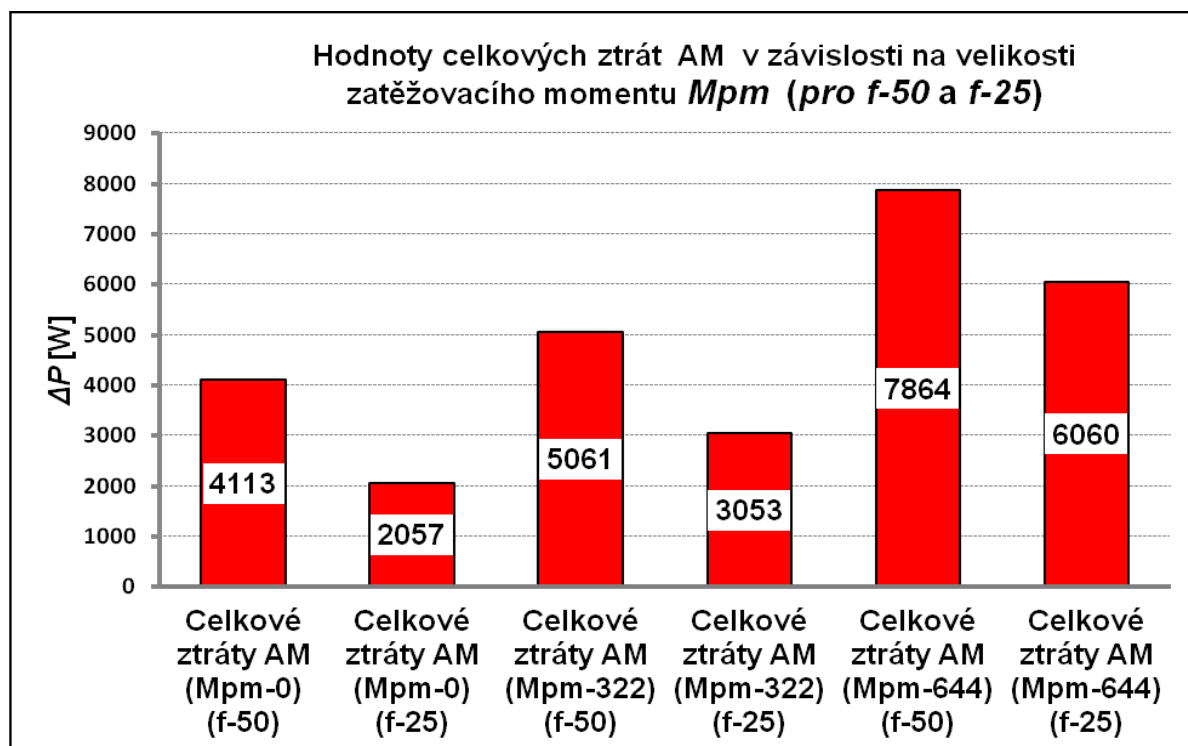


Obr. 80 – Zobrazení průběhů celkových ztrát v pohonu v závislosti na velikosti zvolených hodnot M_{pm} (pro $f=25$)

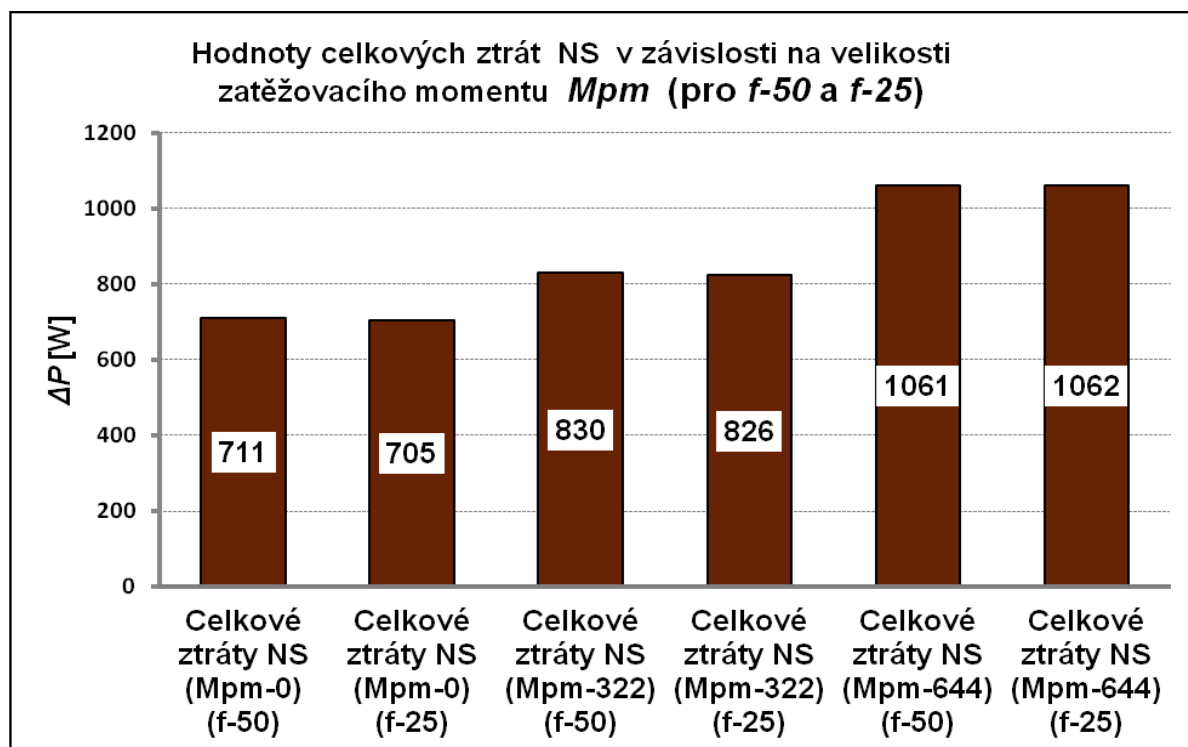


Obr. 81 – Zobrazení rozložení hodnot celkových ztrát v pohonu v závislosti na velikosti zvolených hodnot M_{pm} (pro $f=25$)

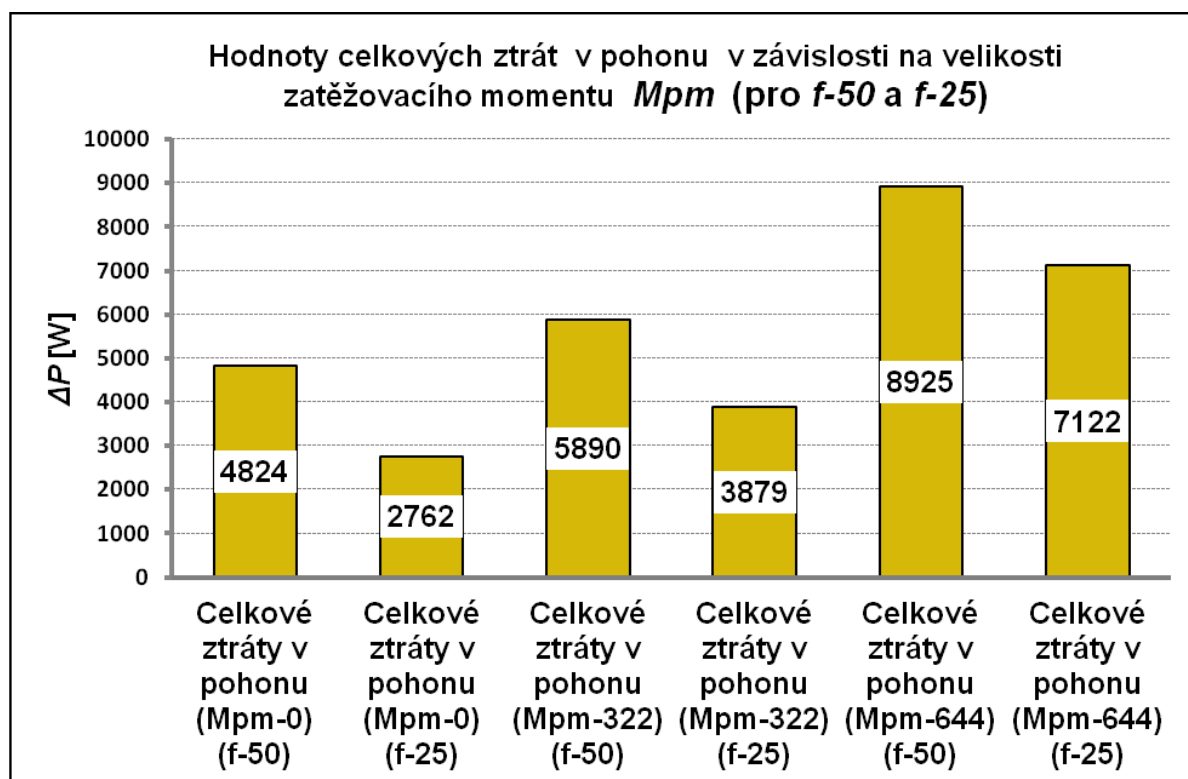
3.12 Porovnání celkových ztrát AM, NS a v pohonu v závislosti na velikosti všech zvolených hodnot zatěžovacího momentu M_{pm} a řídicích napětí se zvolenou hodnotou frekvence



Obr. 82 – Zobrazení rozložení hodnot celkových ztrát AM v závislosti na velikosti zvolených hodnot M_{pm} (pro $f=50$ a $f=25$)

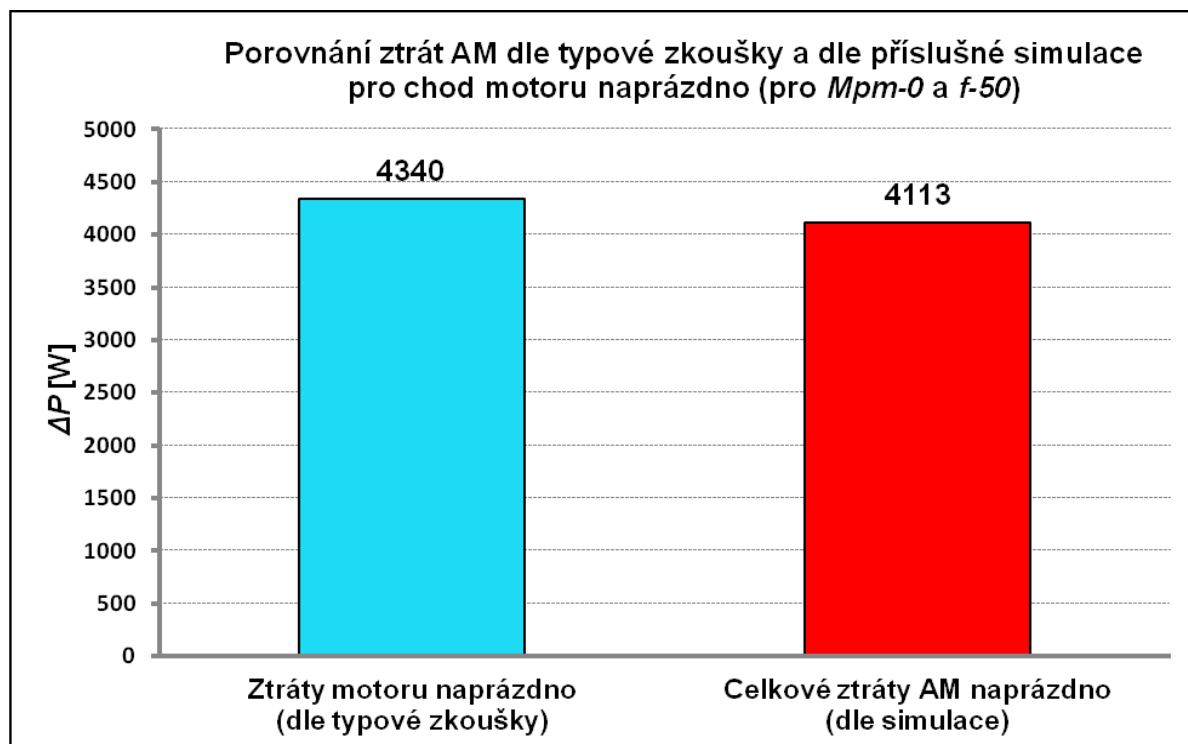


Obr. 83 – Zobrazení rozložení hodnot celkových ztrát NS v závislosti na velikosti zvolených hodnot M_{pm} (pro $f=50$ a $f=25$)

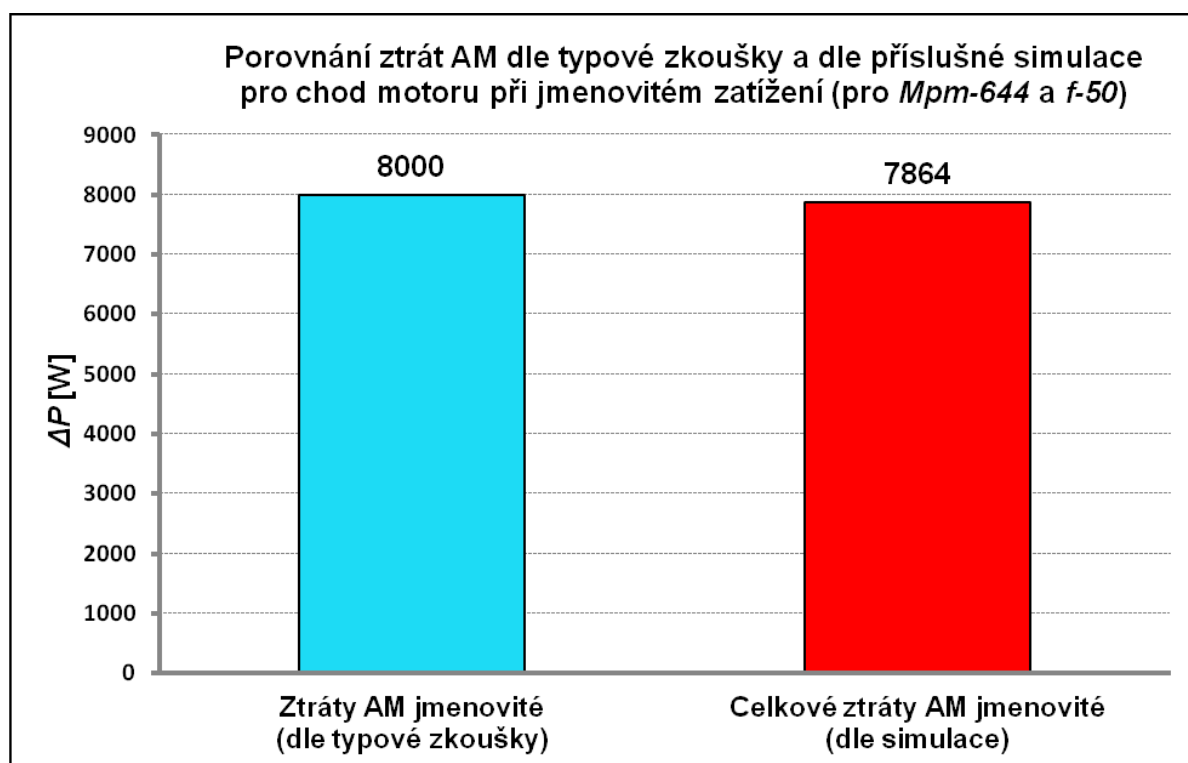


Obr. 84 – Zobrazení rozložení hodnot celkových ztrát v pohonu v závislosti na velikosti zvolených hodnot M_{pm} (pro $f-50$ a $f-25$)

3.13 Porovnání výsledků typové zkoušky týkající se ztrát vybraného asynchronního motoru typu HVM 280M-4 s výsledky z příslušných simulací



Obr. 85 – Porovnání ztrát AM pro chod motoru naprázdno (pro *Mpm-0* a *f-50*)



Obr. 86 – Porovnání ztrát AM pro chod motoru při jmenovitém zatížení (pro *Mpm-644* a *f-50*)

3.14 Příklady výpočtů vybraných ztrát asynchronního motoru a napěťového střídače a jejich porovnání s hodnotami ze simulací

Příklady výpočtů vybraných ztrát budou zpracovány pro variantu nastavení pohonu se jmenovitými nastavenými parametry (Mpm-644 a f-50)

- a) Příklad výpočtu Jouleových ztrát asynchronního motoru

$$\Delta P_j = 3 \cdot (R_s + R_{21}) \cdot I_N^2$$

$$\Delta P_j = 3 \cdot (0,153 + 0,153) \cdot 68^2 = 4244 \text{ W}$$

(hodnota ztrát na základě simulace: 4042 W)

- b) Příklad výpočtu mechanických ztrát asynchronního motoru

$$\Delta P_{Mech.} \approx K_T \cdot \left(\frac{n_N}{1000} \right)^2 \cdot (10 \cdot D_s)^3$$

$$\Delta P_{Mech.} = 7 \cdot \left(\frac{1484}{1000} \right)^2 \cdot (10 \cdot 0,4)^3 = 986 \text{ W}$$

(hodnota ztrát na základě simulace: 973 W)

- c) Postup výpočtů ztrát vedením a ztrát přepínacích napěťového střídače pro jmenovité hodnoty je zpracován v kapitole 2.8

- celkové ztráty vedením napěťového střídače (ΔP_{Ved_NS})

$$\Delta P_{Ved_NS} = 435,6 \text{ W}$$

(hodnota ztrát na základě simulace: 438,4 W)

- celkové ztráty přepínací napěťového střídače (ΔP_{Pr_NS})

$$\Delta P_{Pr_NS} = 628,8 \text{ W}$$

(hodnota ztrát na základě simulace: 622,4 W)

3.15 Výpočet procentuálního rozložení jednotlivých ztrát AM pro jmenovité nastavené parametry

Hodnota celkových ztrát na základě simulace AM (pro Mpm-644 a f-50): $\Delta P_{AM} = \underline{\underline{7865 \text{ W}}}$

- 1) Hodnota Jouleových ztrát v rámci celkových ztrát: $\Delta P_j = 4042 \text{ W}$

$$\Delta P_j (\%) = \frac{4042}{7865} \cdot 100 = \underline{51,4 \%}$$

- 2) Hodnota ztrát v železe v rámci celkových ztrát: $\Delta P_{Fe} = 1850 \text{ W}$

$$\Delta P_{Fe} (\%) = \frac{1850}{7865} \cdot 100 = \underline{23,5 \%}$$

- 3) Hodnota mechanických ztrát v rámci celkových ztrát: $\Delta P_{Mech} = 973 \text{ W}$

$$\Delta P_{Mech} (\%) = \frac{973}{7865} \cdot 100 = \underline{12,3 \%}$$

- 4) Hodnota přídatných ztrát v rámci celkových ztrát: $\Delta P_{Prtd} = 1000 \text{ W}$

$$\Delta P_{Prtd} (\%) = \frac{1000}{7865} \cdot 100 = \underline{12,8 \%}$$

3.16 Celkové zhodnocení odsimulovaných průběhů a zobrazených hodnot příslušných ztrát

Jednotlivé simulace dílčích částí sestaveného pohonu byly realizovány na základě zvolených hodnot momentu pracovního mechanismu (obr. 19) a zvolených hodnot frekvence řídicího napětí (obr. 20). Všechny tyto simulace byly realizovány v Simulinku.

Kromě potřebných odsimulovaných průběhů bylo pro větší názornost řešeno také zobrazení konkrétních hodnot příslušných ztrát asynchronního motoru, měniče kmitočtu a celého sestaveného pohonu pomocí grafů v programu Excel. Celkové simulační schéma pro všechny varianty momentu pracovního mechanismu a výstupní frekvence z řídicího bloku je znázorněno na obr. 21.

Odsimulované průběhy pohonu s AM napájených z MK společně s konkrétními hodnotami ztrát v programu Excel pro zatěžovací momenty M_{pm-0} , M_{pm-322} a M_{pm-644} a jmenovitou napájecí frekvenci ($f = 50$ Hz) je možno posoudit a vyhodnotit dle obr. 22 až 45. Nejprve jsou pro jednotlivé zatěžovací momenty zobrazeny průběhy a příslušné hodnoty vybraných veličin asynchronního motoru. Hodnoty příkonu motoru jsou buď přímo vypočteny ze známých hodnot (pro chod motoru naprázdno a chod při jmenovitém zatížení) nebo odhadnuty výpočtem dle přibližných hodnot motoru pro danou variantu. Je zde možno si názorně potvrdit a ověřit platnost vztahu mezi příkonem motoru, ztrátami motoru a mechanickým výkonem na hřídeli motoru (vztah 1.4, obr. 23, 31, 39). V další části je možno si dle hodnot jednotlivých ztrát asynchronního motoru (obr. 25, 33, 41) a jednotlivých ztrát napěťového střídače (obr. 27, 35, 43) získat díky zobrazení v Excelu názorný přehled o daných ztrátách a o jejich závislosti na M_{pm} a případně na dalších veličinách týkajících se těchto ztrát. Vzájemné porovnání celkových ztrát AM, NS a celkových ztrát v pohonu pro dané parametry je možno vysledovat dle obr. 46 až 51. Je zde přehledně vyjádřen odpovídající nárůst hodnot celkových ztrát AM (obr. 47), celkových ztrát NS (obr. 49) a celkových ztrát v pohonu (obr. 51) se zvyšováním hodnoty zatěžovacího momentu.

Odsimulované průběhy pohonu pro zatěžovací momenty M_{pm-0} , M_{pm-322} a M_{pm-644} a poloviční hodnotu napájecí frekvence ($f = 25$ Hz) je možno posoudit a vyhodnotit dle obr. 52 až 75. Nejprve jsou opět pro jednotlivé zatěžovací momenty zobrazeny průběhy a příslušné hodnoty vybraných veličin asynchronního motoru. Hodnoty příkonu motoru jsou zde odhadnuty výpočtem. Je možno si také pro tyto varianty nastavených parametrů pomocí odhadnutých výpočtů ověřit platnost vztahu pro výsledný příkon motoru (vztah 1.4, obr. 53, 61, 69). V další části je opět možno si dle hodnot jednotlivých ztrát asynchronního motoru (obr. 55, 63, 71) a jednotlivých ztrát napěťového střídače (obr. 57, 65, 73) získat přehled o daných ztrátách a o jejich závislosti na M_{pm} a nastavené poloviční frekvenci. Vzájemné porovnání celkových ztrát AM, NS a celkových ztrát v pohonu pro dané parametry je možno vysledovat dle obr. 76 až 81. Také zde je přehledně graficky vyjádřen odpovídající nárůst hodnot celkových ztrát AM (obr. 77), celkových ztrát NS (obr. 79) a celkových ztrát v pohonu (obr. 81) se zvyšováním hodnoty zatěžovacího momentu s ohledem na již zmíněnou poloviční hodnotu napájecí frekvence.

V závěrečné části simulací bylo v Excelu provedeno porovnání celkových ztrát AM (obr. 82), NS (obr. 83) a celkových ztrát v pohonu (obr. 84) pro všechny varianty zvolených hodnot M_{pm} a zvolených hodnot frekvence řídicího napětí. Výsledné hodnoty potvrzují údaje z předchozích simulací. Rovněž byly prostřednictvím grafického výstupu z Excelu porovnány a následně potvrzeny výsledky typové zkoušky asynchronního motoru s výsledky příslušných simulací týkající se ztrát motoru naprázdno a ztrát motoru při jmenovitém zatížení (obr. 85 a 86). Poté byly provedeny výpočty vybraných druhů ztrát asynchronního motoru a napěťového střídače a jejich porovnání s hodnotami ztrát při simulacích (kapitola 3.14).

Pro ověření procentuálního rozložení ztrát byly provedeny příslušné výpočty pro jmenovitou hodnotu zatížení motoru a jmenovitou hodnotu frekvence: M_{pm-644} a $f-50$ (kapitola 3.15). Výsledné hodnoty byly porovnány s procentuálním rozložením ztrát motoru na základě údajů od firmy ABB (obr. 2). Výsledky simulací z velké části potvrzují údaje uvedené na motoru. Jsou zde určité rozdíly způsobené jednak částečným zjednodušením při stanovení parametrů asynchronního motoru, jednak odchylkami ve vlastní simulaci v Simulinku a v neposlední řadě tím, že není znám konkrétní typ a výkonové parametry ověřovaného motoru.

Pro zjednodušení byla pro přídavné ztráty motoru zvolena konstantní hodnota pro všechny varianty nastavení pohonu. Je však možno upřesnit tyto hodnoty dle vypočtených (případně odhadnutých) příkonů motoru po ověření a potvrzení jednotlivých závislostí přídavných ztrát. Například dalším měřením konkrétního asynchronního motoru na specializovaném pracovišti vhodném pro tyto účely.

Závěr

V této diplomové práci se podařilo prostřednictvím softwarového produktu Matlab - Simulink po doplnění podkladů z programu Excel názorně a přehledně prezentovat stav výkonových poměrů pohonu s asynchronním motorem napájeným z nepřímého měniče kmitočtu, a to na základě zpracování a sestavení příslušných matematických modelů a odpovídajících simulací s příslušnými bloky ztrát, což bylo také cílem této práce.

Z běžné praxe je známo, že asynchronní motory se v mnoha případech spouštějí pomocí přepínání hvězda - trojúhelník nebo přímým připojením na síť. Tím vznikají značné záběrové proudy motoru, velké mechanické rázy a rovněž také velké poklesy napětí v napájecí síti. Velmi často je proto výhodnější řídit pohony a ostatní zařízení s asynchronními motory pomocí měniče kmitočtu a vyvarovat se tak výše uvedeným nedostatkům. Při návrhu pohonu je mimo ostatní záležitosti nutno brát zřetel také na jednotlivé ztráty, a to především v hlavních částech pohonu (v asynchronním motoru a v měniči kmitočtu).

Zde vytvořený celkový model sestavy pohonu v programu Matlab - Simulink je složen z několika dílčích částí, které jsou vzájemně propojeny a tvoří funkční celek. Hlavními komponenty celého pohonu je model vybraného asynchronního motoru, model zvoleného měniče kmitočtu s napěťovým střídačem a model bloku řídicího napětí. Pohon je dále doplněn o samostatné bloky reprezentující příslušné ztráty. Podobné simulační modely umožňují do svých simulací zahrnout více jevů, jež se běžně v praxi zanedbávají, ale v některých případech mohou podstatně ovlivnit chování vlastního pohonu.

Obecně je možno například do simulací modelu asynchronního motoru zahrnout vliv sycení magnetického obvodu, vliv teploty, případně také vliv povrchového jevu na velikost odporů. V daném případě je (dle zadání) model motoru doplněn pouze o celkový blok ztrát, který v sobě zahrnuje Jouleovy ztráty ve statoru a rotoru, ztráty v železe statoru, mechanické a přídatné ztráty.

V modelu střídače napětí v rámci měniče kmitočtu je možno při simulacích uvažovat úbytky napětí na spínacích prvcích, případně i úbytky napětí způsobené vlivem ochranných dob a vlivem zapínacích a vypínacích dob výkonových tranzistorů. V daném případě je model napěťového střídače doplněn o celkový blok ztrát, který v sobě zahrnuje ztráty vedením a ztráty přepínací.

V praxi je snaha výši jednotlivých ztrát v rámci pohonu odborně posoudit a počítat s nimi v návrhu řešení daného pohonu, případně se snažit konkrétní dílčí ztráty pokud možno co nejvíce minimalizovat. Je možno uvést například řešení pohonu pro řízení asynchronního motoru se zajištěním minimalizace Jouleovy ztrát. Je zde ovšem i po stanovení odpovídajícího algoritmu zapotřebí vysledovat měřením, v jakém rozsahu zatížení motoru a jeho otáček je možno minimalizaci Jouleových ztrát zajistit. V praxi se používá více řešení na minimalizaci příslušných ztrát, ale to je již jiné samostatné téma.

Základní simulační schémata sestavená v rámci této práce jsou připravena na další možnosti vyjádření a hodnocení vybraných výstupních veličin v rámci sestaveného pohonu (otáčky motoru, moment na hřídeli motoru, proud statoru) a další možné souvislosti s hodnotami jednotlivých ztrát. Rovněž je možno v případě potřeby řešit vzájemné vazby příslušných ztrát, posoudit procentuální zastoupení jednotlivých ztrát v motoru a napěťovém střídači nebo zpracovat simulační průběhy a grafické výstupy pro každý druh ztrát zvlášť. Možnosti dalšího využití mohou mít také připravené nasimulované hodnoty momentů jednotlivých ztrát, které jsou závislé na mechanických otáčkách motoru. V neposlední řadě je možno řešit jednotlivé simulace pro frekvence vyšší než je frekvence jmenovitá a následně porovnat vzájemné souvislosti vybraných průběhů a hodnoty příslušných ztrát.

Hlavním přínosem této práce je skutečnost, že se povedlo přehlednou formou zpracovat základní koncept pro řešení výkonových poměrů pohonu s asynchronním motorem napájeným měničem kmitočtu a jeho možné využití v praxi, například při posouzení konkrétního pohonu. Mimo již zmíněné možnosti dalšího využití stávajících sestavených modelů pohonu s příslušnými bloky ztrát je také možno se detailněji zaměřit například na kompletní souhrn ztrát měniče kmitočtu a také podrobně na ztráty v usměrňovači a ztráty v napěťovém meziobvodu. Tímto je možno navázat na již zpracované modely a doplnit je o další zpracované bloky s příslušnými simulacemi včetně odpovídajících posouzení a rozborů.

Seznam použitých zdrojů

- [1] NEBORÁK, Ivo. Mechatronické systémy. Učební texty pro kombinované a distanční studium. VŠB TU Ostrava, 2009.
- [2] BRANDŠTETTER, Pavel. Elektrické regulované pohony III. Učební texty pro kombinované a distanční studium. VŠB TU Ostrava, 2005.
- [3] Vysoké učení technické v Brně. Nezávislý nízkonapěťový trakční asynchronní pohon [online]. [cit. 2013-02-05].
URL:<https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/7259/Dizertace_Matucha.pdf?sequence=2>
- [4] VŠB Ostrava. Studijní opory – Ztráty v AM [online]. [cit. 2013-01-15].
URL:<http://homen.vsb.cz/~hav278/NEP/Studijni_opory/Ztraty_v_AM.pdf>
- [5] ČVUT v Praze. Fakulta elektrotechnická. Výkonová elektronika 1 [online]. [cit. 2013-01-30].
URL:< <http://motor.feld.cvut.cz/www/materialy/AD1B14VE1T/AD1B14VE1.pdf>>
- [6] VŠB Ostrava. Přednášky – asynchronní motory [online]. [cit. 2013-02-28].
URL:<http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/1_AM_FS.pdf>
- [7] ABB. Účinnost elektrických motorů a snižování spotřeby elektrické energie [online]. [cit. 2013-02-15].
URL:<<http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/37850.pdf>>
- [8] Ostroj Hansen + Reinders . Návod k obsluze. Elektrické zařízení měnič kmitočtu EZMK3 č.v. 55161-00-P01. Název NO55161-00-P01, 2011.
- [9] VŠB Ostrava. Studijní opory – Ztráty v MK [online]. [cit. 2013-01-15].
URL: <http://homen.vsb.cz/~hav278/NEP/Studijni_opory/Ztraty_v_MK.pdf>
- [10] XXV. Celostátní konference o elektrických pohonech. Plzeň, 1997. Přednáška – Výkonové poměry v soustavě trojfázový střídač - asynchronní motor.
PATOČKA, Miroslav. VUT FEI Brno, Ústav el. pohonů a výkonové elektroniky
- [11] NEBORÁK, Ivo. Modelování a simulace elektrických regulovaných pohonů. Monografie. VŠB TU Ostrava, 2002. 172s. ISBN 80-248-0083-7
- [12] Vysoké učení technické v Brně. Měnič pro malý 3f asynchronní motor [online]. [cit. 2013-01-29].
URL:<<https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/431/M%C4%9Bni%C4%8D%20pro%20mal%C3%BD%203f%20asynchronn%C3%AD%20motor.pdf?sequence=1>>
- [13] VŠB Ostrava. Pohony s asynchronními motory [online]. [cit. 2013-01-29].
URL: <<http://www.fei1.vsb.cz/kat430/data/erp2/ERP%20-%20Pohony%20s%20AM.pdf>>
- [14] Semikron. Simulační software SEMISEL Simulation [online]. [cit. 2013-02-27].
URL: <<http://www.semikron.com/skcompub/en/index.htm?mode=semisel>>
- [15] KARBAN, Pavel. Výpočty a simulace v programech Matlab a Simulink. Computer Press, a.s., Brno, 2006. 220s. ISBN 978-80-251-1448-3

Přílohy (seznam příloh):

Příloha č. 1

Soubor Matlab (m-file): Parametry pro řešení vybraného asynchronního motoru a zvoleného měniče kmitočtu

Příloha č. 2

Soubor Matlab (m-file): Algoritmus napětového střídače v rámci měniče kmitočtu

Příloha č. 3

Soubor Simulink (.mdl): Zobrazení vnitřního zapojení bloku reprezentujícího měnič kmitočtu

Příloha č. 4

Soubor Simulink (.mdl): Zobrazení vnitřního zapojení bloku, který generuje řídicí napětí

Příloha č. 5

Soubor Simulink (.mdl): Zobrazení dílčích bloků reprezentujících jednotlivé ztráty a momenty ztrát asynchronního motoru

Příloha č. 6

Soubor Simulink (.mdl): Zobrazení vnitřního zapojení bloku reprezentujícího Jouleovy ztráty ve statoru a rotoru asynchronního motoru včetně příslušného momentu ztrát

Příloha č. 7

Soubor Simulink (.mdl): Zobrazení vnitřního zapojení bloku reprezentujícího ztráty v železe asynchronního motoru včetně příslušného momentu ztrát

Příloha č. 8

Soubor Simulink (.mdl): Zobrazení vnitřního zapojení bloku reprezentujícího mechanické ztráty asynchronního motoru včetně příslušného momentu ztrát

Příloha č. 9

Soubor Simulink (.mdl): Zobrazení vnitřního zapojení bloku reprezentujícího přídavné ztráty asynchronního motoru včetně příslušného momentu ztrát

Příloha č. 10

Soubor Simulink (.mdl): Zobrazení dílčích bloků reprezentujících ztráty a momenty ztrát napětového střídače v rámci měniče kmitočtu

Příloha č. 11

Soubor Simulink (.mdl): Zobrazení vnitřního zapojení bloku reprezentujícího ztráty vedením napětového střídače v rámci měniče kmitočtu včetně příslušného momentu ztrát

Příloha č. 12

Soubor Simulink (.mdl): Zobrazení vnitřního zapojení bloku reprezentující přepínací ztráty napětového střídače v rámci měniče kmitočtu včetně příslušného momentu ztrát

Příloha č. 13

Soubor Simulink (.mdl): Vzorový příklad zapojení vnitřních bloků reprezentujících zobrazení příslušných hodnot ztrát a momentů ztrát v asynchronním motoru, napětovém střídači a v pohonu včetně příslušných bloků „To Workspace“.

Vybráno ze základního schématu pro jmenovité hodnoty: $M_{pm} = 644 \text{ Nm}$ a $f = 50 \text{ Hz}$.

Příloha č. 14

Soubor Excel (.xls): Výsledky typové zkoušky asynchronního motoru

Jednotlivé přílohy s výpisem souboru v Matlabu (m-file) a zobrazením vybraných souborů v Simulinku (.mdl):

Příloha č. 1

Soubor Matlab (m-file): Parametry pro řešení vybraného asynchronního motoru a zvoleného měniče kmitočtu

```
%DIPLOMOVA PRACE (Parametry pohonu)
clc;
clear all;

% Zakladni parametry asynchronniho motoru

Rs = 0.153; % [Ohm] Odpor vinutí statoru
R21 = 0.153; % [Ohm] Odpor vinutí rotoru přepočtený na stator (pro symetrický motor)
f_50 = 50; % [Hz] Hodnota základní napájecí jmenovité frekvence
f_25 = 25; % [Hz] Hodnota frekvence snižené (25 Hz) v rámci řídicího napětí
Un = 1000; % [V] Hodnota jmenovitého napájecího napětí motoru (stejně jako UAB1ef)
In = 68; % [A] Hodnota jmenovitého proudu motoru
U0 = 1000; % [V] Hodnota napětí motoru naprázdno (stejně jako Un)
IO = 16.5; % [A] Hodnota proudu motoru naprázdno
cosfi_n = 0.917; % [-] Jmenovitá hodnota účiníku AM (zátěž menice napětí) (0.92)
cosfi_0 = 0.152; % [-] Hodnota účiníku AM (zátěž menice napětí) při chodu naprázdno
K = 1.1; % [-] Konstanta pro ztráty v železe (odhad)
K_50 = K*(f_50^1.6); % [-] Zavislost ztrat v železe na frekvenci (pro 50 Hz) (1.6 je odhad)
K_25 = K*(f_25^1.6); % [-] Zavislost ztrat v železe na frekvenci (pro 25 Hz) (1.6 je odhad)
KT = 7; % [-] Konstanta pro mechanické ztráty motoru s axiální ventilací
Ds = 0.40; % [m] Vnější průměr statoru asynchronního motoru

%Parametry menice kmitočtu (+ ostatní)

UAB1ef = 1000; % [V] Efektivní hodnota sdruženého napětí
PMK = 150*1000; % [W] Největší (zvolený) výkon na zátěži menice kmitočtu
Uf = UAB1ef/sqrt(3); % [V] Efektivní hodnota fázového napětí
Mc = 0.866; % [-] Modulací cinitel
UD_1 = (3*Uf*sqrt(3)*sqrt(2))/pi; % [V] Napětí meziobvodu z usměrnovace
UD = (Uf*sqrt(3))/(1/(sqrt(2))*Mc); % [V] Napětí meziobvodu upravené - pro simulaci
IA1ef = PMK/(sqrt(3)*UAB1ef*cosfi_n); % [A] Efektivní hodnota fázového proudu (pro jmenovité hodnoty)
IA1 = IA1ef*sqrt(2); % [A] Amplituda 1.harmonické fázového proudu
UAB1_1 = Mc*UD_1; % [V] Amplituda 1.harmonické sdruženého napětí stridace
UAB1 = Mc*UD; % [V] Amplituda 1.harmonické sdruženého napětí stridace pro upravené UD
UpT = 1.1; % [V] Prahové napětí tranzistoru
RdT = 0.006; % [Ohm] Dynamický odpor tranzistoru
UpD = 1.1; % [V] Prahové napětí diody
RdD = 0.003; % [Ohm] Dynamický odpor diody
fsp = 2000; % [Hz] Spinací frekvence menice kmitočtu (stridace napětí)
IC = 300; % [A] Kolektorový proud tranzistoru dle katalogu
IF = 300; % [A] Propustný proud nulové diody dle katalogu
ET = 288*0.001; % [J] Ztrátová energie při spínání a vypínání tranzistoru
ED = 78*0.001; % [J] Ztrátová energie při spínání a vypínání nulové diody
K1 = IA1/IC; % [-] Cinitel proudového využití tranzistoru
K2 = IA1/IF; % [-] Cinitel proudového využití nulové diody
deltaPPrid_AM = 1000; % [W] Pridávne ztráty nmotoru (zde dle zkušenosti odborný odhad)
```

Příloha č. 2

Soubor Matlab (m-file): Algoritmus napěťového střídače v rámci měniče kmitočtu

```
%DIPLOMOVA PRACE
%Algoritmus_NAPETOVY_STRIDAC

function [Ua,Ub,Uc]= Napetovy_stridac(UD,Ura,Urb,Urc,Up)

%#Napetovy_stridac_PWM

if Ura>=Up
    Ua0=UD/2;
else Ua0=-UD/2;
end;

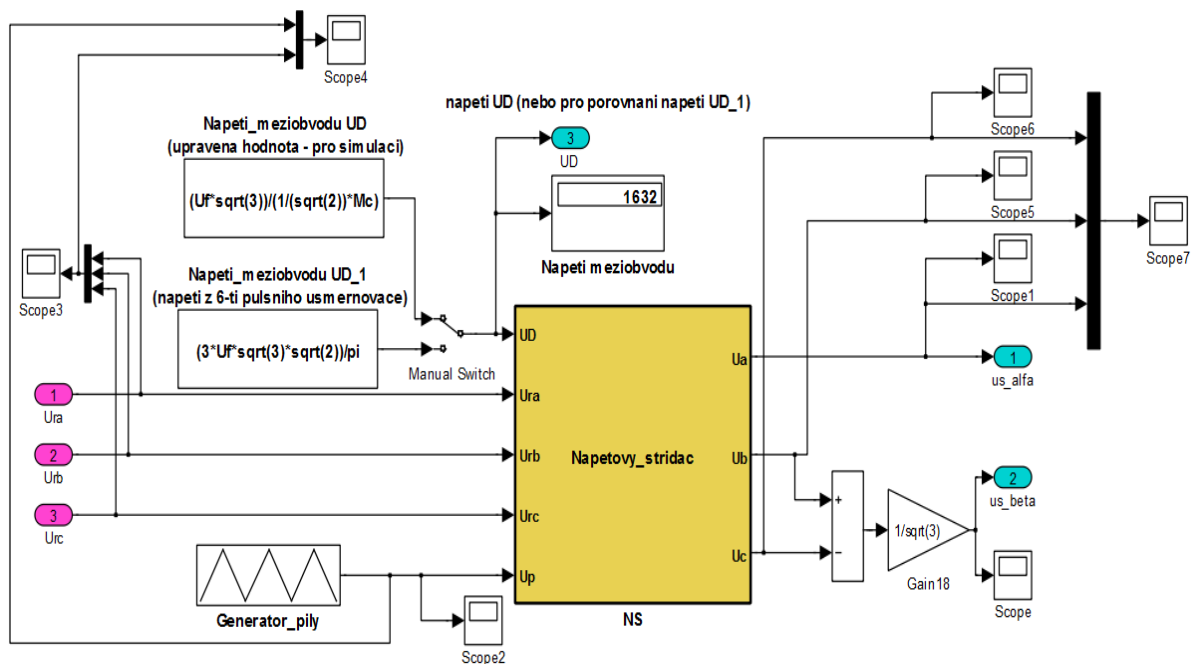
if Urb>=Up
    Ub0=UD/2;
else Ub0=-UD/2;
end;

if Urc>=Up
    Uc0=UD/2;
else Uc0=-UD/2;
end;

Ua= (2*Ua0-Ub0-Uc0) / 3;
Ub= (2*Ub0-Uc0-Ua0) / 3;
Uc= (2*Uc0-Ua0-Ub0) / 3;
```

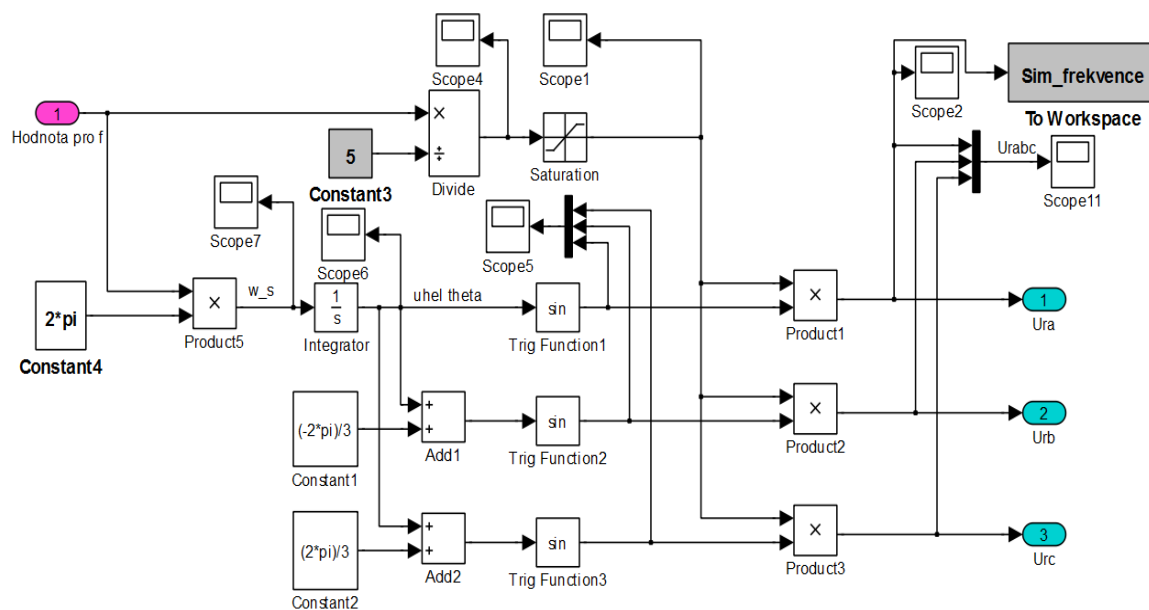
Příloha č. 3

Soubor Simulink (.mdl): Zobrazení vnitřního zapojení bloku reprezentujícího měnič kmitočtu



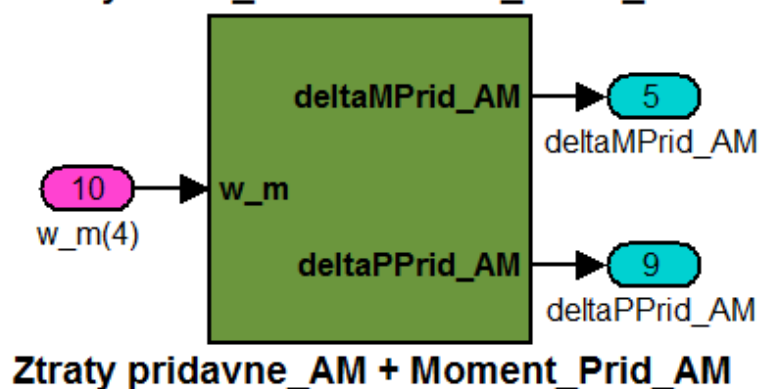
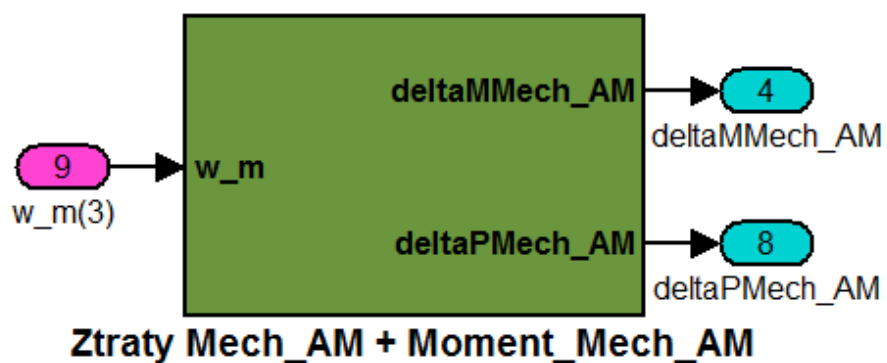
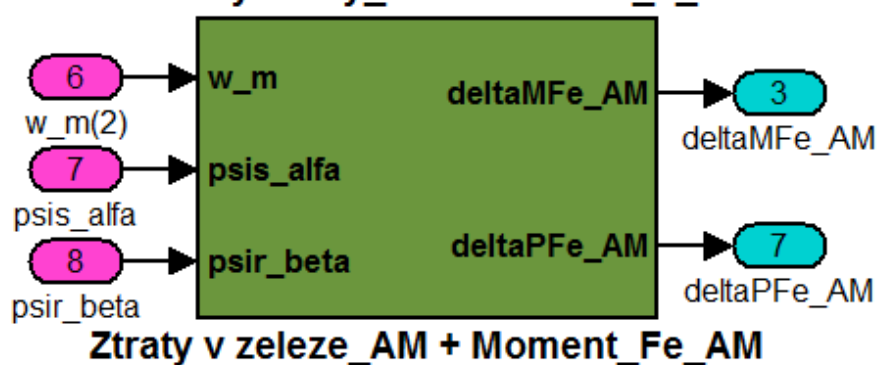
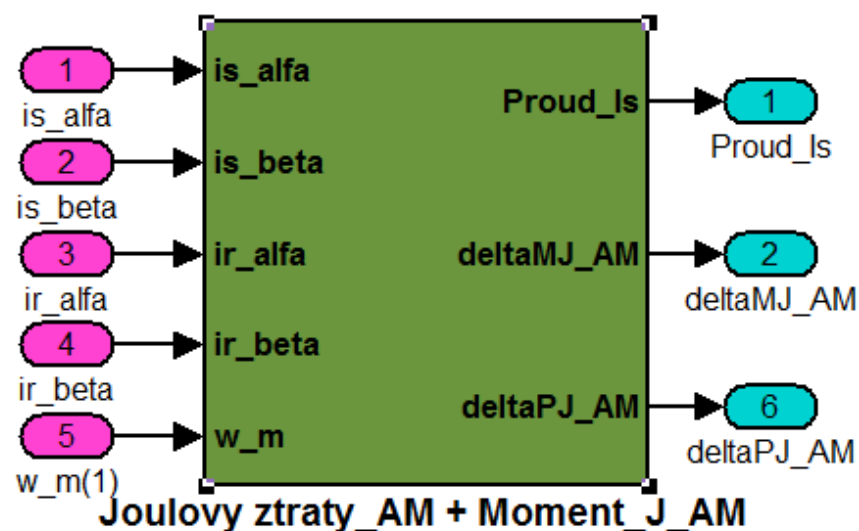
Příloha č. 4

Soubor Simulink (.mdl): Zobrazení vnitřního zapojení bloku, který generuje řídicí napětí



Příloha č. 5

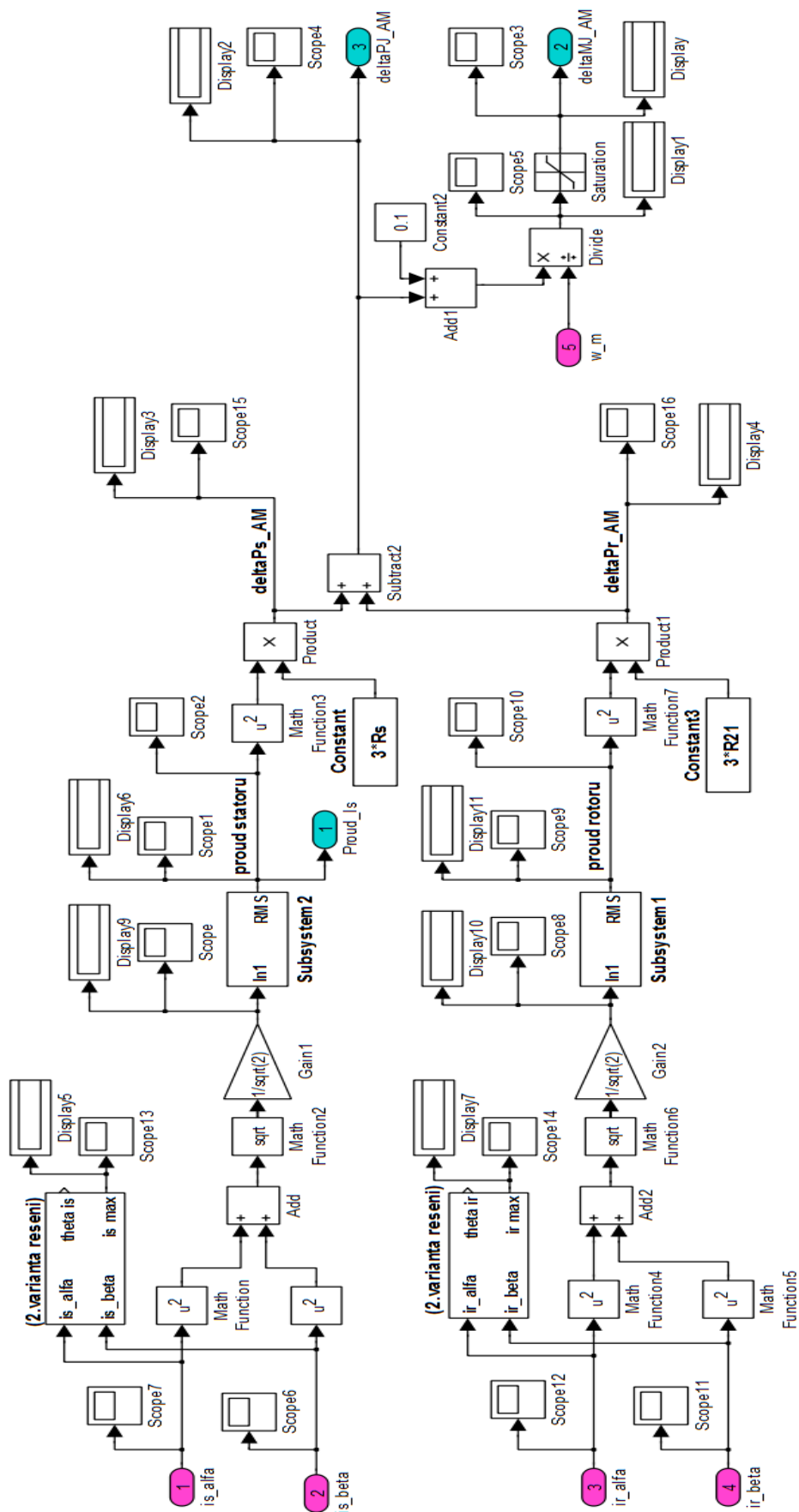
Soubor Simulink (.mdl): Zobrazení dílčích bloků reprezentujících jednotlivé ztráty a momenty ztrát asynchronního motoru



Příloha č. 6

Soubor Simulink (.mdl): Zobrazení vnitřního zapojení bloku reprezentujícího Jouleovy ztráty ve statoru a rotoru asynchronního motoru včetně příslušného momentu ztrát

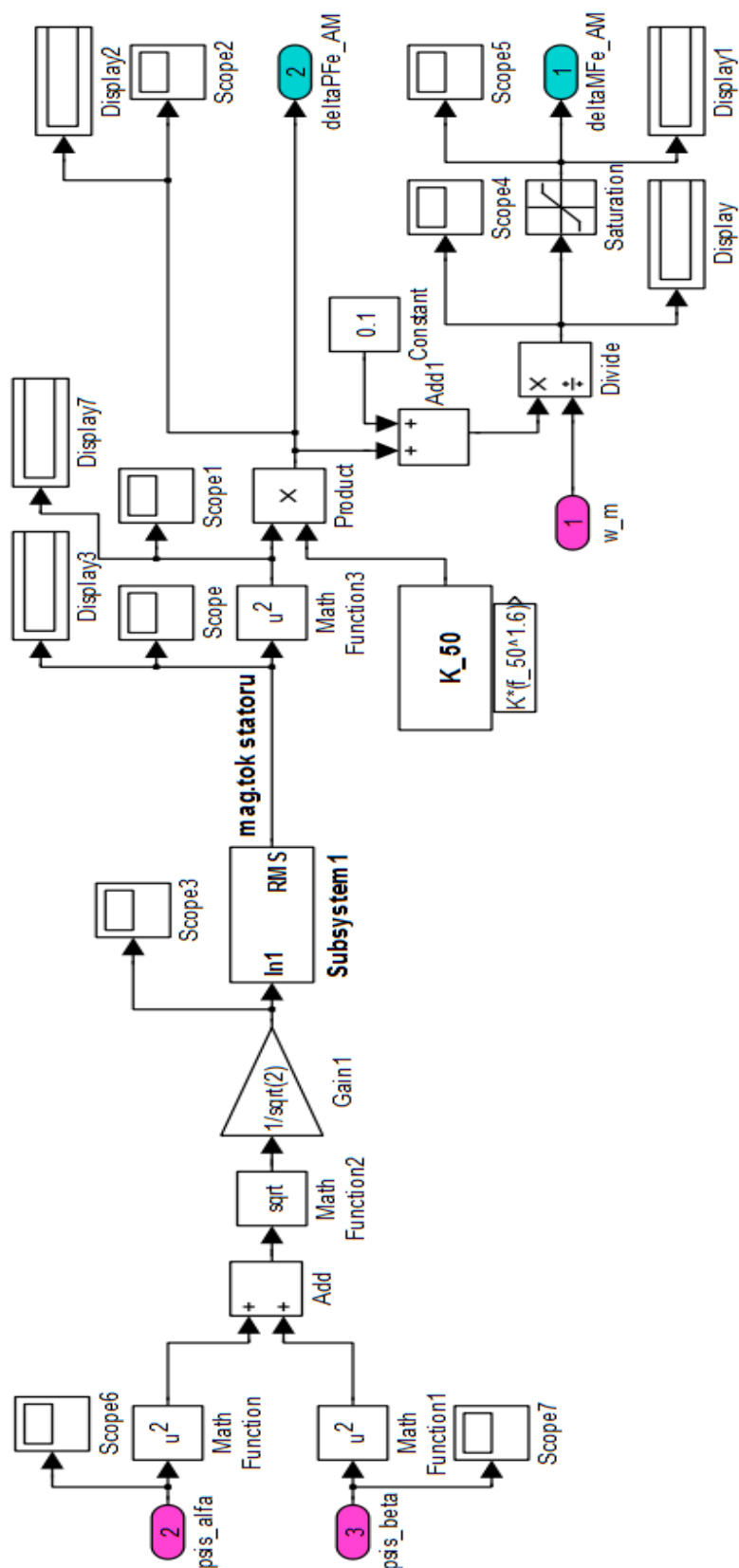
Jouleovy ztráty (ve statoru a v rotoru) v asynchronním motoru



Příloha č. 7

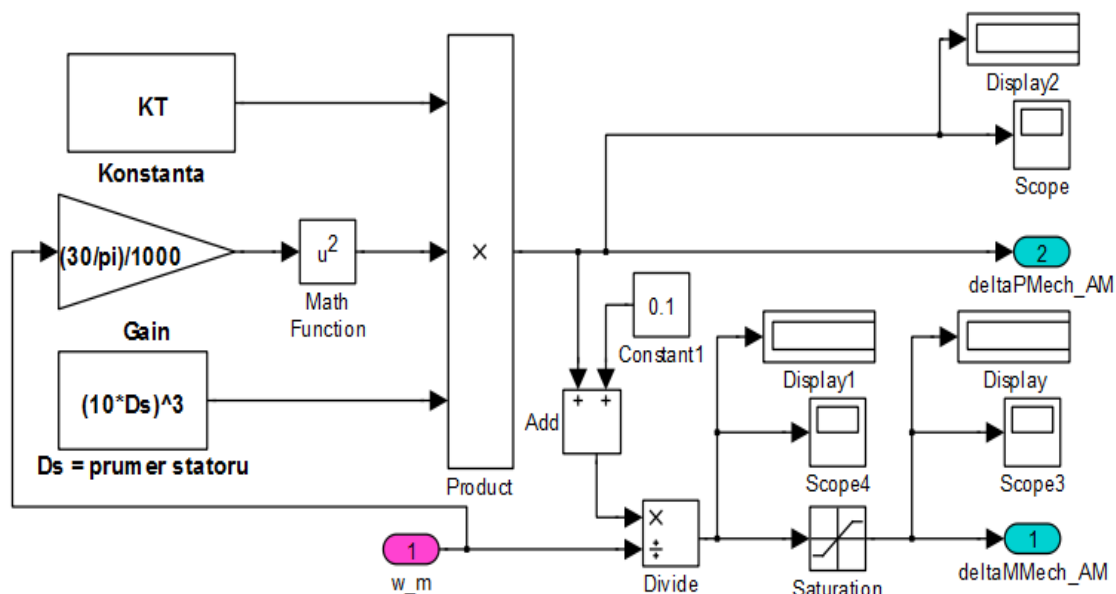
Soubor Simulink (.mdl): Zobrazení vnitřního zapojení bloku reprezentujícího ztráty v železe asynchronního motoru včetně příslušného momentu ztrát

Ztráty v železe (v železe statoru) v asynchronním motoru



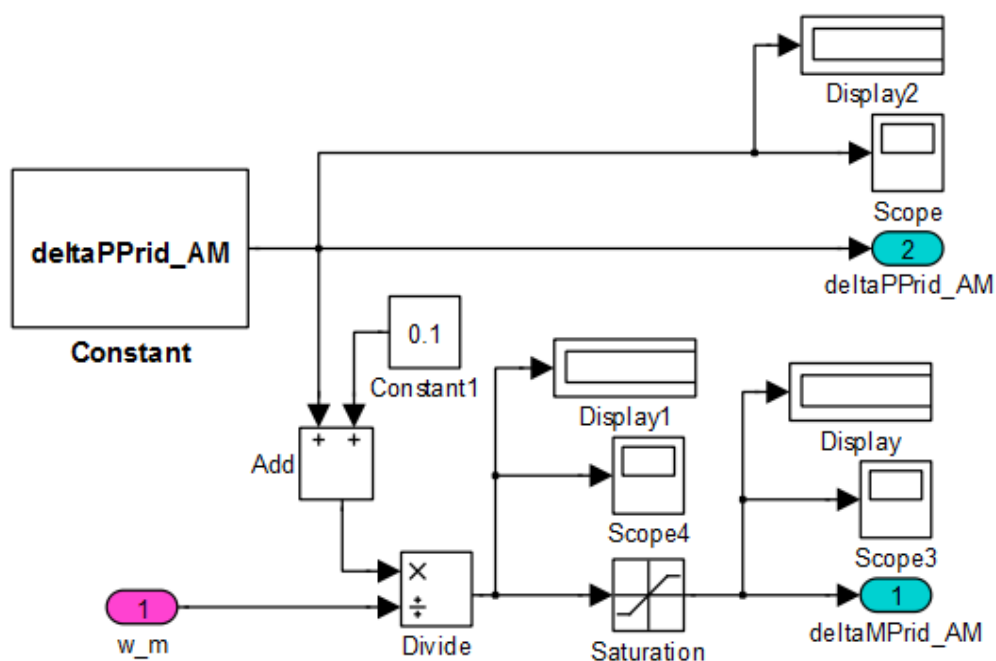
Příloha č. 8

Soubor Simulink (.mdl): Zobrazení vnitřního zapojení bloku reprezentujícího mechanické ztráty asynchronního motoru včetně příslušného momentu ztrát



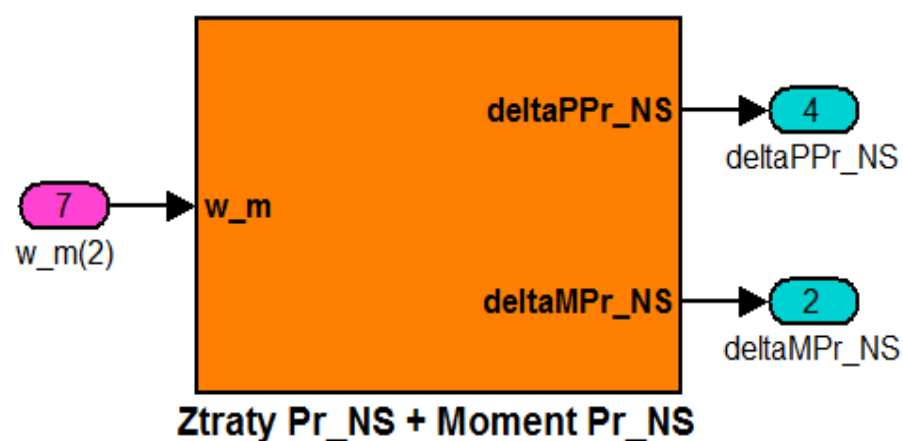
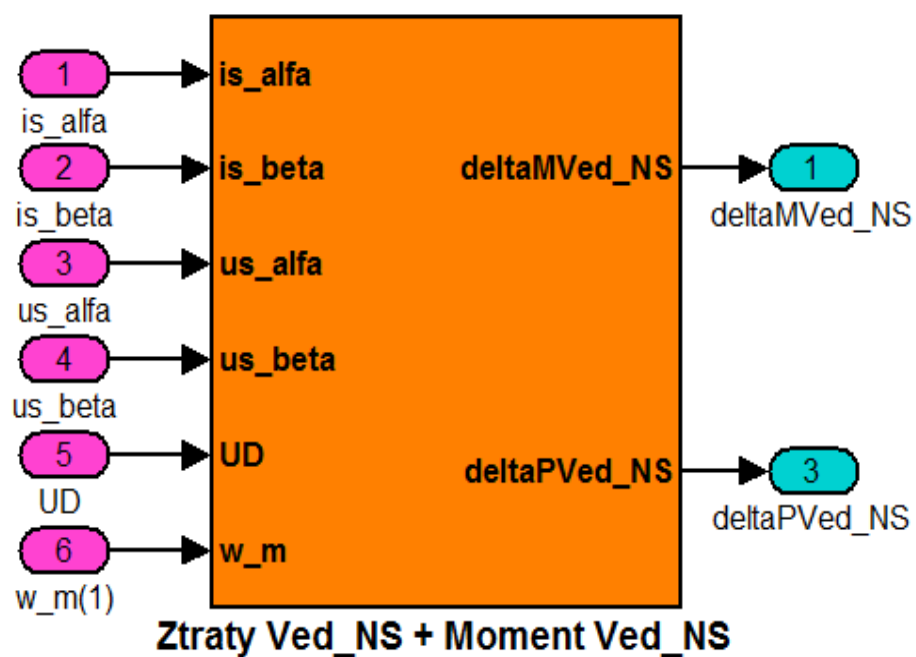
Příloha č. 9

Soubor Simulink (.mdl): Zobrazení vnitřního zapojení bloku reprezentujícího přidavné ztráty asynchronního motoru včetně příslušného momentu ztrát



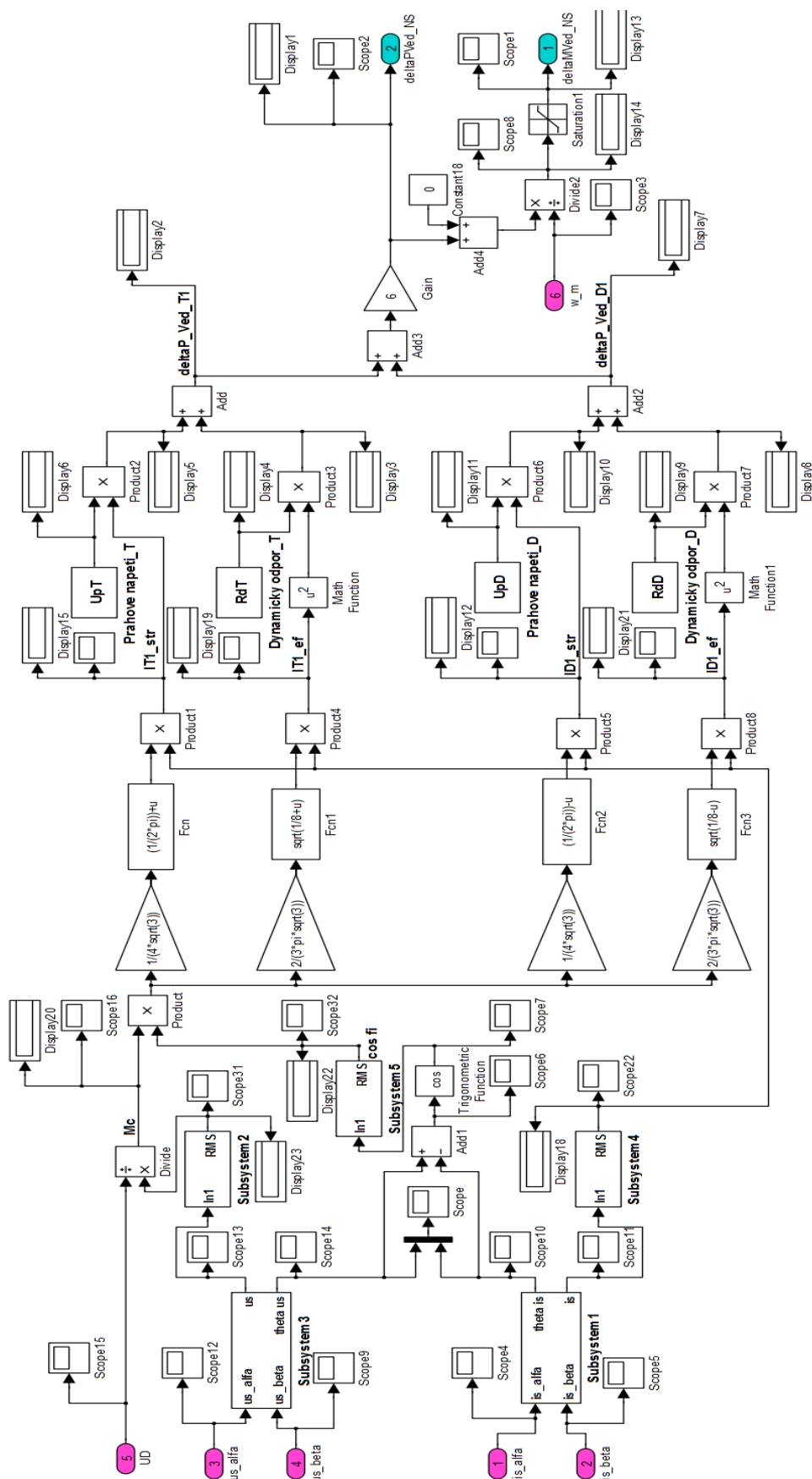
Příloha č. 10

Soubor Simulink (.mdl): Zobrazení dílčích bloků reprezentujících ztráty a momenty ztrát napěťového střídače v rámci měniče kmitočtu



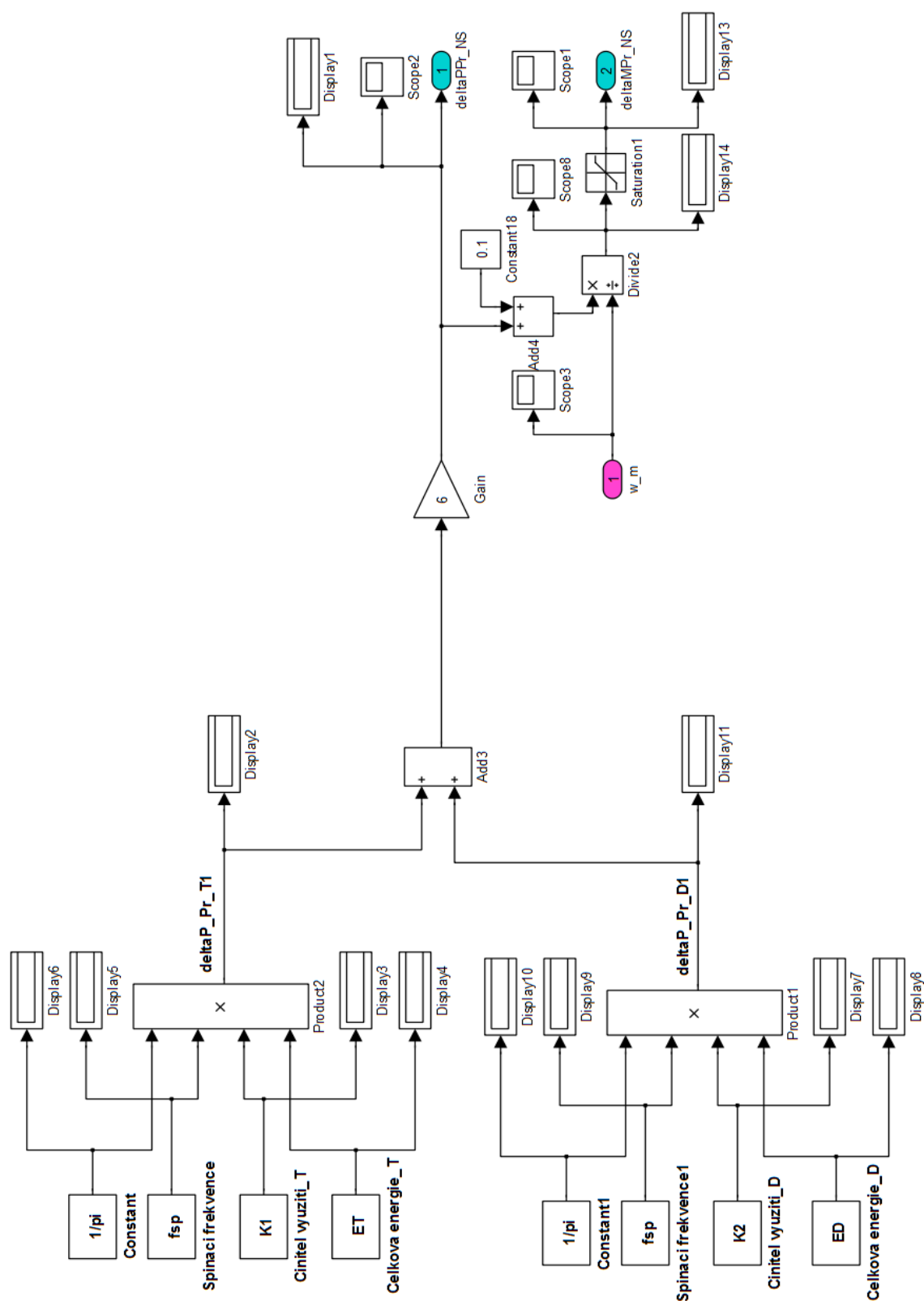
Příloha č. 11

Soubor Simulink (.mdl): Zobrazení vnitřního zapojení bloku reprezentujícího ztráty vedením napětového střídače v rámci měniče kmitočtu včetně příslušného momentu ztrát



Příloha č. 12

Soubor Simulink (.mdl): Zobrazení vnitřního zapojení bloku reprezentujícího přepínací ztráty napětového střídače v rámci měniče kmitočtu včetně příslušného momentu ztrát

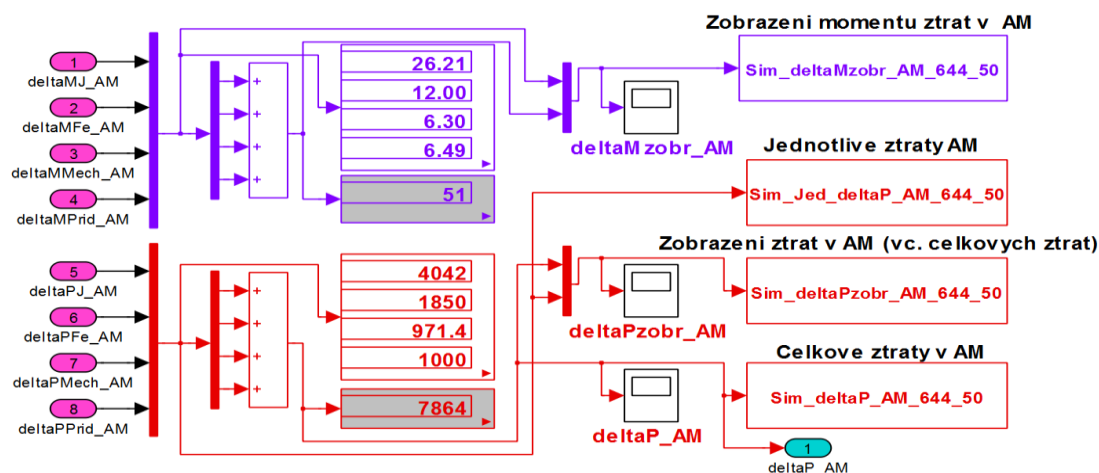


Příloha č. 13

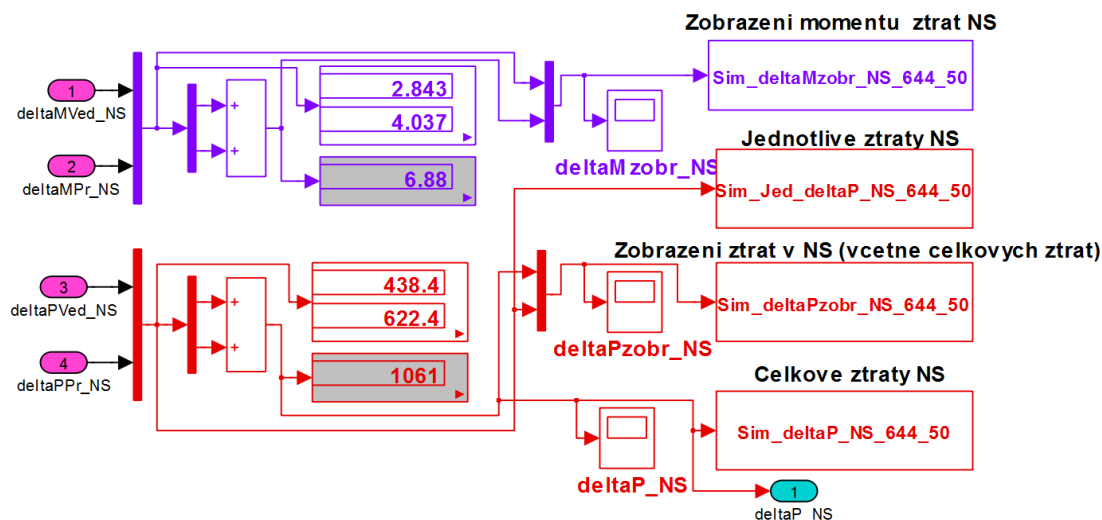
Soubor Simulink (.mdl): Vzorový příklad zapojení vnitřních bloků reprezentujících zobrazení příslušných hodnot ztrát a momentů ztrát v asynchronním motoru, napěťovém střídači a v pohonu včetně příslušných bloků „To Workspace“.

Vybráno ze základního schématu pro jmenovité hodnoty: $M_{pm} = 644 \text{ Nm}$ a $f = 50 \text{ Hz}$.

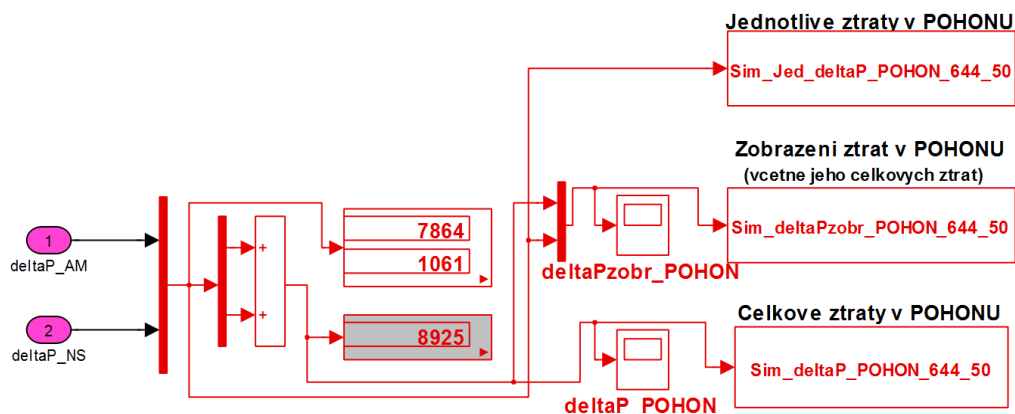
Hodnoty a možnost dalšího zobrazení příslušných veličin AM



Hodnoty a možnost dalšího zobrazení příslušných veličin NS



Hodnoty a možnost dalšího zobrazení příslušných veličin POHONU



Příloha č. 14

Soubor Excel (.xls): Výsledky typové zkoušky asynchronního motoru

Typová zkouška asynchronního motoru		Hodnoty	
TYP: HVM 280M-4, 100kW, 1000V, 68A, 1484 ot/min			
3	Měření činného odporu za studena	R_F	107.44 mΩ
		θ_{vin}	17.8 °C
12	Měření proudu a ztrát naprázdno	U_0	1000 V
		I_0	16.5 A
		P_0	4340 W
		θ_{vin}	20 °C
13	Měření a kontrola účinníku, účinnosti a skluzu (ze zatěžovací zkoušky v ustáleném oteplení)	U_N	1000 V
		I_N	68 A
		P_{1N}	108004 W
		n	1484 ot/min
		M_N	644 Nm
		θ_{vin}	125 °C
		$\cos\phi$	0.917
		η	92.613 %
		s	1.0667 %
14	Zkouška proudové přetížitelnosti Pozn. (jedná se o nevýbušné elektrické zařízení s certifikátem vydaným autorizovanou zkušebnou, stroj je možné použít výhradně za podmínek uvedených v certifikátu. Při poklesu napětí v síti v nevýbušném prostředí umožňuje certifikát trvalé proudové přetížení max. 10%)	I_{max}/I_N	5,4
15	Zkouška momentové přetížitelnosti Pozn. (jedná se o nevýbušné elektrické zařízení s certifikátem vydaným autorizovanou zkušebnou, stroj je možné použít výhradně za podmínek uvedených v certifikátu. Stroj v nevýbušném prostředí nelze trvale momentově přetížet, mechanicky je stroj přetěžován pouze při rozběhu maximálně do momentu zvratu)	M_{max}/M_N	3,2
17	Měření proudu a ztrát nakrátko	U_k	184 V
		I_k	68 A
		P_k	9380 W
		θ_{vin}	125 °C
		$R_F^{125\pm 0.5}$	153.394 mΩ
		I_k	369.6 A
18	Měření záběrného momentu a proudu	$I_z = I_k$	369.6 A
		M_z	1405.7 Nm
		M_{zab}/M_N	2.2
20	Stanovení momentu setrvačnosti rotoru	$J=$	5,07 kgm ²
21	Měření rotorového napětí		
	U klecového vinutí rotorové napětí nelze změřit		